

# **AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES DE COBERTURA: COMPORTAMENTO À HUMIDADE E ACV**

**LUÍS DUARTE NEVES MOREIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientadora: Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho

JANEIRO DE 2020

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Avós

*“Não te acredites no que te dizem, acredita-te em apenas metade do que vês, mas acredita em tudo o que fazes”*

*Eduardo Ferreira*



## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação, significa um capítulo terminado na minha vida, enquanto estudante, e o início de outro, como engenheiro civil.

Não posso deixar de agradecer a todos os que, nos mais diversos níveis, contribuíram para a sua concretização.

Expresso o meu apreço à Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho, pela constante disponibilidade, valorização científica, conselhos e simpatia, e em especial, por acreditar que conseguiria ultrapassar este desafio.

Aos meus pais, pelo apoio constante, carinho e valores que me transmitiram ao longo de toda a minha vida.

Aos meus avós, pelo amor demonstrado em toda a minha vida.

A todos os meus amigos, com quem posso contar nos bons e menos bons momentos.

Aos meus amigos e colegas de estudo, Francisca Futuro, André Nóbrega, Bernardo Passos, Miguel Ferreira Pinto, Cátia Melissa, Ricardo Mourão, Rui Pina, Luís Paulo Silva, e Jorge Aroso Pedra, por toda a amizade durante o meu percurso académico.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por estes anos de crescimento e aprendizagem.



## **RESUMO**

A indústria da construção civil é das principais atividades causadoras de alterações irreversíveis e impactes no planeta Terra, devido à exploração intensiva de recursos e à excessiva produção de resíduos, culminando numa alteração dos ecossistemas.

A humidade é um fenómeno que constitui uma das principais causas de deterioração de um edifício. O aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, resulta no desenvolvimento de várias formas de degradação do edifício, com consequências, por vezes, graves. Este fenómeno pode ter origem na ocorrência de condensações internas. A ocorrência deste fenómeno depende da constituição dos elementos construtivos e das condições climáticas existentes nos ambientes exterior e interior.

Para a análise da humidade nas várias coberturas, será utilizado o software WUFI.

Desta forma, a cobertura assume um papel fundamental para a prevenção destes acontecimentos, dado ser o primeiro elemento, pertencente ao edifício, a que a água entra em contacto quando precipita.

Nesta dissertação será utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que é uma técnica de gestão ambiental, que permite avaliar os impactes ambientais causados pela produção de materiais de um elemento construtivo. Numa primeira fase, serão avaliados os impactes ambientais das diferentes constituições de cobertura selecionadas e, posteriormente, será avaliada mais especificamente a relevância de cada um dos materiais utilizados para esses impactes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade, Humidade, Coberturas, WUFI, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)





## **ABSTRACT**

The construction industry is a major cause of irreversible change and impact on planet Earth due to the misuse of resources and excessive waste production, culminating in a change in ecosystems.

Moisture is a phenomenon that is one of the main causes of deterioration of a building. Unscheduled appearance of water in building elements results in the development of various forms of building degradation, with sometimes serious consequences. This phenomenon may originate from the occurrence of internal condensations. The occurrence of this phenomenon depends on the constitution of the construction elements and on the outdoor and indoor climatic conditions.

For the analysis of humidity in the various roofs, the software WUFI will be used.

Thus, the roof plays a key role in preventing these events, as it is the first element in the building that water comes into contact with when it precipitates.

In this dissertation Life Cycle Assessment (LCA) methodology will be used, which is an environmental management technique, which allows to evaluate the environmental impacts caused by the production of materials of a building element. In a first phase, the environmental impacts of the different types of studied roofs will be assessed, and then, more specifically, the relevance of each material for those impacts will be evaluated

**KEYWORDS:** Sustainability, Humidity, Roofs, WUFI, Life Cycle Assessment (LCA)



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVO .....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA.....	2
<b>2 COBERTURAS E HUMIDADE .....</b>	<b>4</b>
2.1. COBERTURAS.....	4
2.1.1. ENQUADRAMENTO .....	4
2.1.2. TIPOS DE COBERTURAS .....	4
2.1.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS .....	5
2.1.4. COBERTURAS INCLINADAS .....	7
2.1.5. COBERTURAS PLANAS .....	10
2.2. HUMIDADE, CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES E CONDENSAÇÕES ENTRE CAMADAS DO ELEMENTO CONSTRUTIVO .....	14
<b>3 SUSTENTABILIDADE E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....</b>	<b>17</b>
3.1. SUSTENTABILIDADE .....	17
3.1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	17
3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	20
3.2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	21
3.2.2. CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL .....	24
3.2.3. IMPACTES AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO .....	25
3.2.4. MEDIDAS SUSTENTÁVEIS A APLICAR .....	27
3.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) .....	28
3.3.1. ENQUADRAMENTO .....	28
3.3.2. OBJETIVO E PROPÓSITO .....	29
3.3.3. ETAPAS DE REALIZAÇÃO DE UMA ACV .....	30
3.3.4. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO.....	30
3.3.5. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV) .....	30
3.3.6. AVALIAÇÃO DE IMPACTE DO CICLO DE VIDA .....	32

3.3.7. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	33
3.3.8. VARIANTES DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	33
3.3.9. QUANTIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTE AMBIENTAL .....	35
3.3.10. FERRAMENTAS PARA ACV .....	36
<b>3.4. PROGRAMA WUFI.....</b>	<b>37</b>
3.4.1. MOTIVOS DA SUA UTILIZAÇÃO.....	37
3.4.2. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA.....	37
3.4.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA .....	38
<b>4 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2. ELEMENTOS NECESSÁRIOS À EXECUÇÃO DE UMA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>46</b>
4.2.1. PROPRIEDADES IMPORTANTES DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	46
4.2.2. LOCALIZAÇÃO E ORIENTAÇÃO.....	47
4.2.3. CONDIÇÕES EXTERIORES .....	48
4.2.4. CONDIÇÕES INTERIORES .....	49
4.2.5. PERÍODO DE SIMULAÇÃO .....	50
<b>4.3. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ANALISADAS .....</b>	<b>50</b>
4.3.1. COBERTURAS INCLINADAS .....	51
4.3.2. COBERTURAS PLANAS .....	59
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS NO PROGRAMA WUFI .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>5.2. ESPECIFICIDADES DO PROGRAMA WUFI. ....</b>	<b>64</b>
5.2.1. DADOS DE SAÍDA .....	64
5.2.2. MALHA UTILIZADA .....	65
5.2.3. CLIMA EXTERIOR UTILIZADO EM CADA SIMULAÇÃO .....	66
<b>5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS PARA CADA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DE COBERTURAS.....</b>	<b>68</b>
5.3.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS ..	68
5.3.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS ..	71
5.3.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS ..	73
5.3.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS ....	76
5.3.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUINTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS .....	78
5.3.6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEXTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS.....	81
5.3.7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS .....	83

5.3.8. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS.....	85
5.3.9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS .....	87
5.3.10. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS .....	89
<b>5.4. REFLEXÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>91</b>
<b>6 APLICAÇÃO DA ACV ÀS COBERTURAS ANALISADAS.</b>	<b>93</b>
<b>6.1. ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>93</b>
<b>6.2. METODOLOGIA DE ACV NA ANÁLISE GERAL DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE COBERTURAS .....</b>	<b>93</b>
6.2.1. NOÇÕES INICIAIS.....	93
6.2.2. MODELO DE ACV E DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS ANALISADOS.....	94
6.2.3. TRATAMENTO DE DADOS .....	94
6.2.4. MATERIAIS UTILIZADOS.....	94
<b>6.3. INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA CADA UMA DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ESTUDADAS.....</b>	<b>107</b>
6.3.1. POTENCIAL DE DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP),EMPREGUE EM COBERTURAS.....	107
6.3.2. POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP),EMPREGUE EM COBERTURAS.....	108
6.3.3. POTENCIAL DE DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE EM COBERTURAS .....	109
6.3.4. POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE EM COBERTURAS .....	110
6.3.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP), EMPREGUE EM COBERTURAS .....	110
6.3.6. CATEGORIA DE EUTROFIZAÇÃO (EP), EMPREGUE EM COBERTURAS .....	111
6.3.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR), EMPREGUE EM COBERTURAS .....	112
6.3.8. CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE EM COBERTURAS.....	113
<b>6.4. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA CADA MATERIAL UTILIZADO .....</b>	<b>114</b>
6.4.1. CATEGORIA DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	115
6.4.2. CATEGORIA CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	116
6.4.3. CATEGORIA DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	117
6.4.4. CATEGORIA ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	117
6.4.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	118
6.4.6. CATEGORIA POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO (EP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	119
6.4.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	120

6.4.8. CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	121
<b>6.5. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA 1 KG DE MATERIAL UTILIZADO .....</b>	<b>122</b>
6.5.1. CATEGORIA DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP) EMPREGUE A 1 KG DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO .....	122
6.5.2. CATEGORIA CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	124
6.5.3. CATEGORIA DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	124
6.5.4. CATEGORIA ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	126
6.5.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	127
6.5.6. CATEGORIA POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO (EP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	127
6.5.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	128
6.5.8. CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .....	128
<b>6.6. CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO.....</b>	<b>129</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>130</b>
<b>7.1. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>130</b>
<b>7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>131</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>133</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Classificação das coberturas quanto à pendente .....	4
Fig. 2.2 - Classificação das exigências funcionais de coberturas inclinadas e planas, adaptado de (Gouveia, [s.d.]) .....	7
Fig. 2.3 - Esquema estrutural de uma cobertura inclinada.....	8
Fig. 2.4 - Localização do Isolamento térmico numa cobertura inclinada com desvão habitável .....	9
Fig. 2.5 - Localização do isolamento térmico numa cobertura inclinada com desvão não habitável ...	10
Fig. 2.6 - Cobertura não acessível .....	11
Fig. 2.7 - Esquema de cobertura acessível a pessoas .....	11
Fig. 2.8 - Esquema de cobertura acessível a veículos ligeiros ou pesados .....	11
Fig. 2.9 - Esquema de cobertura com isolamento térmico intermédio, cobertura tradicional, acessível a pessoas.....	12
Fig. 2.10 - Esquema de cobertura invertida .....	13
Fig. 2.11 - Esquema de cobertura com isolamento térmico aplicado sob a estrutura resistente .....	13
Fig. 2.12 - Esquema de cobertura com isolamento térmico sobre o teto falso .....	13
Fig. 2.13 - Diagrama psicométrico.....	15
Fig. 2.14 - Mapa de temperaturas médias anuais em Portugal continental.....	16
Fig. 2.15 - Mapa de temperaturas médias mensais em Portugal continental nos meses de Janeiro e Julho respetivamente.....	16
Fig. 3.1 - Taxa de crescimento médio anual de CO <sub>2</sub> .....	18
Fig. 3.2 - Concentração atmosférica de CO <sub>2</sub> em Mauna Loa.....	18
Fig. 3.3 - Concentração atmosférica global de CO <sub>2</sub> .....	19
Fig. 3.4 - Aquecimento global e emissões de CO <sub>2</sub> entre 1880 e 2015.....	19
Fig. 3.5 - Concentração dos diversos GEE ao longo dos anos .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Fig. 3.6 - Evolução do número de artigos em revistas internacionais contendo as palavras "desenvolvimento sustentável" como palavras-chave.....	22
Fig. 3.7 - Pilares do desenvolvimento sustentável .....	22
Fig. 3.8 - Pegada ecológica e bio capacidade no mundo entre 1961 e 2013 .....	23
Fig. 3.9 - Prioridades da construção sustentável .....	25
Fig. 3.10 - Impactes do ciclo de vida das construções.....	26
Fig. 3.11 - etapas do ICV.....	31
Fig. 3.12 - elementos da fase do IACV.....	32
Fig. 3.13 - Categorias de impacte ambiental.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
Fig. 3.14 - Variantes do ACV .....	34
Fig. 3.15 - Fases do ciclo de vida incluídas nas variantes da ACV .....	34



Fig. 3.16 - Ecrã principal WUFI .....	39
Fig. 3.17 - Menu principal WUFI.....	39
Fig. 3.18 - Elemento construtivo/Posições de monitorização .....	41
Fig. 3.19 - Orientação/Inclinação/Altura .....	41
Fig. 3.20 - Coeficiente de transferência à superfície.....	42
Fig. 3.21 - Condições Iniciais .....	42
Fig. 3.22 - Exterior, lado esquerdo do elemento construtivo .....	43
Fig. 3.23 - Interior, lado direito do elemento construtivo .....	43
Fig. 3.24 - Exemplo de um material que se encontra na base de dados do programa WUFI.....	44
Fig. 3.25 - Tipos de gráficos que se pode obter no programa WUFI após a realização da simulação	45
Fig. 4.1 - Mapa com a localização selecionada .....	47
Fig. 4.2 - Temperatura, humidade relativa e precipitação em Lisboa .....	48
Fig. 4.3 - temperatura e humidade, valores máximos e mínimos, e chuva incidente .....	49
Fig. 4.4 - Temperaturas e humidade interior .....	50
Fig. 4.5 - Esquema da cobertura inclinada 1 sem a barreira pára-vapor.....	51
Fig. 4.6 - Esquema construtivo da cobertura inclinada 2 sem barreira pára-vapor .....	52
Fig. 4.7 - Esquema da cobertura inclinada 3 sem a barreira pára-vapor.....	54
Fig. 4.8 - Esquema da cobertura inclinada 4 sem a barreira pára-vapor.....	55
Fig. 4.9 - Esquema da cobertura inclinada 5 .....	56
Fig. 4.10 - Esquema construtivo da cobertura inclinada 6.....	58
Fig. 4.11 - Esquema construtivo da cobertura plana 2 .....	60
Fig. 4.12 - Esquema construtivo da cobertura plana 3 .....	61
Fig. 4.13 - Esquema construtivo da cobertura plana 4 .....	62
Fig. 5.1 - Seleção de dados de saída no programa WUFI.....	65
Fig. 5.2 - Dados de saída disponíveis no programa WUFI .....	65
Fig. 5.3 - Malha utilizada em cada simulação .....	66
Fig. 5.4 - Precipitação e radiação solar utilizado em cada simulação .....	67
Fig. 5.5 - Temperatura e humidade relativa considerado em cada simulação .....	68
Fig. 5.6 - Gráfico do teor de humidade total na cobertura 1 sem a barreira pára-vapor (1_CI_PVC_XPS) .....	69
Fig. 5.7 - Valores do teor de humidade total e por camadas da cobertura inclinada 1 (1_CI_PVC_XPS) .....	69
Fig. 5.8 - Filme da simulação da cobertura inclinada 1 sem barreira pára-vapor (1_CI_PVC_XPS)...	70
Fig. 5.9 - Filme da simulação da cobertura inclinada 1 com barreira pára-vapor.....	70

Fig. 5.10 - Gráfico do Teor de Humidade da cobertura inclinada 2 durante a simulação.....	71
Fig. 5.11 - Valores do Teor de Humidade total e por camadas da cobertura inclinada 2.....	72
Fig. 5.12 - Filme da simulação da cobertura inclinada 2.....	72
Fig. 5.13 - Gráfico do teor de Humidade da cobertura inclinada 3 durante a simulação .....	73
Fig. 5.14 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 3 .....	74
Fig. 5.15 - Filme da simulação da cobertura inclinada 3 sem barreira pára-vapor .....	74
Fig. 5.16 - Filme da simulação da cobertura inclinada 3 com barreira pára-vapor (3_CI_FB_LA_PV)	75
Fig. 5.17 - Gráfico do teor de humidade da cobertura inclinada 4 durante o período de simulação ....	76
Fig. 5.18 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 4 .....	77
Fig. 5.19 - Filme da simulação da cobertura inclinada 4 sem a barreira pára-vapor (4_CI_CE_LA) ...	77
Fig. 5.20 - Filme da simulação da cobertura 4 com barreira pára-vapor (4_CI_CE_LA_PV) .....	78
Fig. 5.21 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura inclinada 5 durante o período de simulação .....	79
Fig. 5.22 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 5 .....	79
Fig. 5.23 - Filme da simulação da cobertura inclinada 5 sem barreira pára-vapor .....	80
Fig. 5.24 - Filme da simulação da cobertura inclinada 5 com barreira pára-vapor .....	80
Fig. 5.25 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura inclinada 6 durante o período de simulação .....	81
Fig. 5.26 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 6 .....	82
Fig. 5.27 - Filme da simulação da cobertura inclinada 6.....	82
Fig. 5.28 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 1 (1_CPT_PVC_XPS_PV-POLI) durante a simulação .....	83
Fig. 5.29 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 1 (1_CPT_PVC_XPS_PV-POLI).....	84
Fig. 5.30 - Filme da simulação da cobertura plana 1 (1_CPT_PVC_XPS_PV-POLI) .....	84
Fig. 5.31 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 2 durante a simulação .....	85
Fig. 5.32 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 2.....	86
Fig. 5.33 - Filme da simulação da cobertura plana 2 .....	86
Fig. 5.34 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 3 durante o período de simulação ..	87
Fig. 5.35 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 3.....	88
Fig. 5.36 - Filme da simulação da cobertura plana 3 .....	88
Fig. 5.37 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 4 durante o período de simulação ..	89
Fig. 5.38 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 4.....	90
Fig. 5.39 - Filme da simulação da cobertura plana 4 .....	90

Fig. 6.1 - Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP) para todas as coberturas .....	108
Fig. 6.2 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) para todas as coberturas .....	109
Fig. 6.3 - Potencial de destruição da camada do ozono (ODP) .....	109
Fig. 6.4 - Potencial de acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP) .....	110
Fig. 6.5 - Potencial de formação de ozono troposférico (POCP) .....	111
Fig. 6.6 - Potencial de eutrofização (EP) .....	112
Fig. 6.7 - Categoria Energia não renovável incorporada (ENR) .....	113
Fig. 6.8 - Categoria energia renovável incorporada (ER) .....	114
Fig. 6.9 - Categoria diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP), para Kg/m2 de material	115
Fig. 6.10 - Categoria contribuição para o aquecimento global (GWP), para Kg/m2 de material.....	116
Fig. 6.11 - Categoria contribuição para a destruição da camada do ozono (ODP), para Kg/m2 de material.....	117
Fig. 6.12 - Categoria contribuição para a acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP), para Kg/m2 de material.....	118
Fig. 6.13 - Categoria contribuição para a formação de ozono troposférico (POCP), para Kg/m2 de material.....	119
Fig. 6.14 - Categoria contribuição para a eutrofização (EP), para Kg/m2 de material .....	120
Fig. 6.15 - Categoria energia não renovável incorporada (ENR), para Kg/m2 de material .....	121
Fig. 6.16 - Categoria energia renovável incorporada (ER), para Kg/m2 de material.....	121
Fig. 6.17 - Categoria diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP), para 1 Kg de material.	123
Fig. 6.18 - Categoria aquecimento global (GWP), para 1 Kg de material .....	124
Fig. 6.19 - Categoria destruição da camada do ozono (ODP), para 1Kg de material .....	125
Fig. 6.20 - Categoria acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP), para 1Kg de material.....	126
Fig. 6.21 - Categoria formação de ozono troposférico (POCP), para 1Kg de material .....	127
Fig. 6.22 - Categoria potencial de eutrofização (EP), para 1Kg de material .....	127
Fig. 6.23 - Categoria energia não renovável incorporada (ENR), para 1Kg de material .....	128
Fig. 6.24 - Categoria energia renovável incorporada (ER), para 1Kg de material.....	128



**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 3.1 - Contribuição dos GEE para o efeito de estufa, adaptado de .....	21
Quadro 3.2 - Políticas, medidas e ferramentas que promovem a construção sustentável, adaptado de .....	28
Quadro 3.3 - Medidas que promovam a sustentabilidade, adaptado de .....	28
Quadro 3.4 - Fases de implementação da ACV na indústria da construção .....	30
Quadro 3.5 - Categorias de impacto ambiental a adotar, adaptado de .....	36
Quadro 3.6 - Ferramentas/software para ACV .....	37
Quadro 3.7 - Propriedades dos materiais do programa WUFI .....	44
Quadro 3.8 - Condições climáticas do programa WUFI .....	45
Quadro 4.1 - Lista de coberturas e respetiva abreviatura .....	51
Quadro 4.2 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 1 para coberturas inclinadas .....	52
Quadro 4.3 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 2 para coberturas inclinadas .....	53
Quadro 4.4 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 3 para coberturas inclinadas .....	55
Quadro 4.5 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 4 para coberturas inclinadas .....	56
Quadro 4.6 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 5 para coberturas inclinadas .....	57
Quadro 4.7 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 6 para coberturas inclinadas .....	58
Quadro 4.8 - Esquema construtivo da cobertura plana 1 .....	59
Quadro 4.9 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 1 para coberturas planas .....	60
Quadro 4.10 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 2 para coberturas planas .....	61
Quadro 4.11 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 3 para coberturas planas .....	62
Quadro 4.12 - Propriedades dos materiais utilizados na cobertura plana 4 .....	63
Quadro 6.1 - Materiais Utilizados nas coberturas inclinadas 1, 2, 3 e 4 .....	95
Quadro 6.2 - Materiais Utilizados nas coberturas inclinadas 5 e 6 .....	95
Quadro 6.3 - Materiais Utilizados nas coberturas planas 1 .....	95
Quadro 6.4 - Materiais utilizados na cobertura plana 2 .....	96
Quadro 6.5 - Materiais utilizados na cobertura plana 3 .....	96
Quadro 6.6 - Materiais utilizados na cobertura plana 4 .....	96
Quadro 6.7 - Propriedades os materiais utilizados nas coberturas estudadas .....	97
Quadro 6.8 - Impactes associados à produção de 1Kg de material .....	99
Quadro 6.9 - Quantificação das categorias de impacto ambiental da cobertura inclinada 1 .....	100
Quadro 6.10 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 2 .....	100
Quadro 6.11 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 3 .....	101
Quadro 6.12 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 4 .....	102

Quadro 6.13 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura inclinada 5 .....	102
Quadro 6.14 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura inclinada 6 .....	103
Quadro 6.15 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 1 .....	104
Quadro 6.16 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 2 .....	105
Quadro 6.17 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 3 .....	105
Quadro 6.18 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 4 .....	106
Quadro 6.19 - Impactes totais de cada cobertura, segundo cada indicador.....	107

## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

ACV - Avaliação do ciclo de vida

ADP - Esgotamento de recursos abióticos

AP - Acidificação do solo e dos recursos hídricos

CFC's – Clorofluorcarbonetos

ENR - Energia não renovável

EP - Eutrofização

EPS - Poliestireno expandido moldado

ER - Energia renovável

GDP - Gross Domestic Product

GEE - Gases com efeito de estufa

GWP - Potencial de aquecimento global

IACV – Interpretação da Avaliação do Ciclo de Vida

ICV - Inventário do ciclo de vida

INE - Instituto nacional de estatística

ISO - International Organization for Standardization

LCA - Life cycle assessment

LCC - Life cycle cost

LCI - Life cycle inventory

OCDE - Organização de cooperação e desenvolvimento económico

ODP - Destruição da camada de ozono estratosférico OSB - Oriented Strand Board

POCP - Formação de ozono troposférico

XPS - Poliestireno expandido extrudido

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A construção civil é uma indústria que é responsável por grande parte dos impactos ambientais no nosso planeta. O enorme consumo energético, em conjunto com a extração de matérias primas não renováveis levam a um aumento das emissões de gases com efeito de estufa, provocando, deste modo, um aumento das alterações climáticas, que afetam gravemente o planeta Terra.

A humidade é um fenómeno que constitui uma das principais causas de deterioração de um edifício. O aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, resulta no desenvolvimento de várias formas de degradação do edifício, com consequências, por vezes, graves. Este fenómeno pode ter origem na ocorrência de condensações internas. A ocorrência deste fenómeno depende da constituição dos elementos construtivos e das condições climáticas existentes nos ambientes exterior e interior. Ao entrar em contacto com superfícies mais frias, a humidade absoluta do ar atinge o limite de saturação para a temperatura em causa, ocorrendo, desta forma, condensações. Desta forma, a cobertura assume um papel fundamental para a prevenção destes acontecimentos, dado ser o primeiro elemento, pertencente ao edifício, a que a água entra em contacto quando precipita.

Para analisar a prestação das coberturas, em relação à humidade, será utilizado o programa de origem alemã WUFI.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é um procedimento analítico que tem como objetivo avaliar o conteúdo em recursos e os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto manufacturado.

A escolha de uma cobertura, que se mostre eficaz na proteção do edifício aos agentes climáticos, garantindo o mínimo impacto ambiental possível, apesar de complexa, e muitas vezes cara, torna-se preponderante para uma melhor qualidade de vida do Homem, quer no interior da sua habitação, quer no exterior.

### 1.2. OBJETIVO

Nesta dissertação, pretende-se avaliar soluções construtivas para coberturas de edifícios, do ponto de vista do seu comportamento à humidade, nomeadamente, do risco de ocorrência de condensações o qual condicionará a sua maior ou menor durabilidade e, simultaneamente, realizar uma avaliação do ciclo de vida dessas soluções e dos seus materiais constituintes.

Desta forma, pretende-se com esta avaliação, identificar soluções construtivas que, simultaneamente, garantam um adequado comportamento à humidade e um correspondente baixo impacto ambiental.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA**

Esta dissertação está desenvolvida em sete capítulos, nos quais são abordados os seguintes temas:

O Capítulo 1 consiste na apresentação formal do trabalho e da estrutura que o compõe.

No Capítulo 2 apresenta alguns conceitos relacionados com coberturas. Serão abordados e explicados os vários tipos de coberturas, as suas exigências funcionais, bem como alguns dos seus materiais constituintes. Serão também desenvolvidos alguns conceitos relativamente à humidade num edifício, as condensações internas e entre camadas, bem como as consequências destes fenómenos.

O Capítulo 3 foca-se principalmente num tema, bastante atual, que é a sustentabilidade. Serão abordados os impactes ambientais, bem como algumas medidas sustentáveis existentes. Será discutido, também a metodologia Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite analisar os impactes ambientais provocados pelos materiais. Por fim, será explicado o software utilizado para realizar as simulações das coberturas, para estudar o seu comportamento à humidade.

No Capítulo 4, serão apresentadas as coberturas escolhidas para a realização deste estudo.

No Capítulo 5, ocorrerá a análise de resultados das simulações de cada cobertura, no programa WUFI.

No Capítulo 6, é implementada a metodologia ACV às coberturas utilizadas, e, posteriormente, serão apresentados os resultados, bem como alguns comentários.

No Capítulo 7, são expostas as conclusões do estudo realizado nos capítulos anteriores, e sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros possíveis para este tema.



# 2

## COBERTURAS E HUMIDADE

### 2.1. COBERTURAS

#### 2.1.1. ENQUADRAMENTO

As coberturas são um dos elementos com maior importância num edifício. A sua função principal é proteger os edifícios dos vários agentes atmosféricos, especialmente da chuva do vento e da radiação solar. Assim, as coberturas, têm um papel preponderante no que respeita ao conforto térmico e acústico de um edifício. Não obstante, as coberturas, têm ainda uma contribuição estética de relevância num edifício. (Novais, 2017)

#### 2.1.2. TIPOS DE COBERTURAS

As coberturas de um edifício são diferenciadas consoante a pendente que apresentam, sendo classificadas como cobertura inclinada, cobertura em terraço ou plana. Referente à cobertura plana, existe a cobertura com pendente nula, no entanto esta não será alvo de análise uma vez que, segundo o artigo 43.º do Regime Geral das Edificações Urbanas (RGEU), a inclinação mínima que garante o escoamento das águas pluviais é de 1%. (Gouveia, 2015)

Tipo de Cobertura	Pendente
Cobertura inclinada	$> 5\%$
Cobertura em terraço ou plana	$1\% \leq i \leq 5\%$
Cobertura em terraço com pendente nula	$< 1\%$

Fig. 2.1 - Classificação das coberturas quanto à pendente, adaptado de (Novais, 2017)

A cobertura mais frequente em Portugal é a inclinada, que tem como principal funcionalidade o escoamento da água da precipitação, no entanto, comparando com as coberturas em terraço, apresenta um menor aproveitamento do espaço útil, mesmo que contenham um vão habitável.

Não obstante, ao longo do tempo, as coberturas planas, começaram a ser uma alternativa, sendo que em 2011, cerca de 10% das escolhas arquitetónicas utilizaram este tipo de construção. (Novais, 2017)

### 2.1.3. EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

Todas as partes que constituem uma obra de construção civil, na sua generalidade, devem cumprir certos requisitos básicos para o período de vida útil economicamente razoável, segundo a Diretiva dos Produtos de Construção, como por exemplo:

- Resistência mecânica e estabilidade;
- Higiene, saúde e ambiente;
- Segurança contra incêndios;
- Proteção contra o ruído;
- Segurança e acessibilidade na utilização;
- Economia de energia e isolamento térmico;
- Utilização sustentável dos recursos naturais;

A satisfação de exigências funcionais, onde se encontram englobados os requisitos mínimos discriminados, podem se dividir em quatro grupos distintos: Segurança, habitabilidade, economia e durabilidade, garantindo, desta forma, a manutenção de níveis adequados do desempenho das coberturas. (Novais, 2017)

No que toca às exigências de segurança, a característica fundamental no dimensionamento de uma cobertura prende-se na garantia da segurança para ações de carga variável e peso próprio, bem como a boa resistência às ações dos agentes atmosféricos, e evitando a propagação de incêndios.

<b>Exigências de Segurança</b>	
Segurança estrutural	Dimensionamento para combinação de ações
Segurança contra os riscos de incêndio	Comportamento ao fogo dos elementos de construção utilizados
	Reação ao fogo dos materiais utilizados
Segurança contra ações por utilização	Ações de punçoamento
	Ações de choque acidentais
Resistência das camadas não estruturais a outras ações	Ações de agentes atmosféricos
	Variação das condições ambientais interiores
<b>Exigências de Durabilidade</b>	
Manutenção do desempenho	Conservação das resistências mecânicas
	Conservação dos materiais
	Resistências a ações decorrentes do uso normal
Limpeza, manutenção e reparação	
<b>Exigências de Habitabilidade</b>	

Estanquidade		Água
		Neve
		Poeiras
		Permeabilidade ao ar
Conforto Higrotérmico	Conforto de Inverno	Isolamento térmico
		Risco de condensações
	Conforto de Verão	Isolamento térmico
		Proteção solar
		Controlo das correntes de ar
Conforto Acústico		Sons aéreos
		Sons de percussão
Conforto Visual		Iluminação natural
		Refletividade da camada de proteção
Conforto ao Toque		Rugosidade e aspereza das superfícies
		Existência de arestas vivas
Disposição de acessórios e equipamentos		
Aspeto Interior e exterior		Linearidade das arestas
		Planeza e defeitos da superfície
		Limitação da ocorrência de manchas
Qualidade do ar		Possibilidade de regulação da ventilação
		Limitação da emissão de odores pelos materiais
Higiene		Limitação da ocorrência e desenvolvimento de substâncias nocivas ou insalubres
Exigências de Economia		
Limitação do Custo Global		Custos de construção
		Custos de manutenção
		Custos de reparação
Economia de Energia		Custos de exploração
Outras		
Estabilidade Geométrica		
Processo construtivo		

---

## Sustentabilidade

---

Fig. 2.2 - Classificação das exigências funcionais de coberturas inclinadas e planas, adaptado de (Gouveia, [s.d.] )

Quanto às exigências da habitabilidade, estas encontram-se diretamente relacionadas com a conexão entre os utilizadores e as suas necessidades, e o edifício e as exigências funcionais. As noções ligadas a conforto, tanto higrotérmico, acústico, bem como de aspeto visual são consideradas nesta fase, onde são tidos em conta os isolamentos acústicos e térmicos, iluminação natural, estética, e proteção solar. A estanquidade é um ponto fundamental, sendo das principais funções das coberturas a proteção do interior do edifício contra agentes externos.

A conservação das características dos materiais e respeito da vida útil de projeto através de trabalhos de manutenção, reparação e limpeza garantem as exigências de durabilidade de coberturas em terraço e inclinadas.

Todo o processo que envolve a realização de uma cobertura (seleção, dimensionamento e construção) deve garantir a máxima economia, cumprindo sempre as necessidades dos utilizadores bem como as exigências funcionais do edifício. Neste conceito de economia, não se deve ter em conta, apenas, os aspetos financeiros de construção, manutenção, reparação e exploração de uma cobertura, neste ponto é de fundamental importância a preocupação ambiental associada a todas as fases do ciclo de vida da cobertura. (Ana Novais, 2017)

### 2.1.4. COBERTURAS INCLINADAS

Como referido anteriormente, a cobertura inclinada, é o sistema construtivo mais utilizado em Portugal. Estas são identificadas por superfícies inclinadas, denominadas por águas, com inclinações superiores a 8%, sendo esta a característica principal deste tipo de coberturas. Esta inclinação varia conforme a exposição ambiental a que está sujeita, sendo o vento, precipitação e neve os principais condicionantes. O tipo de utilização do espaço interior é definido pela forma e revestimento da superfície plana. (Gouveia, 2015)

O sistema de coberturas inclinadas é formado pela junção de vários elementos, apresentados na Fig. 2.3, que podem ser constituídos em betão armado, metal, madeira, ou por uma combinação destes materiais.

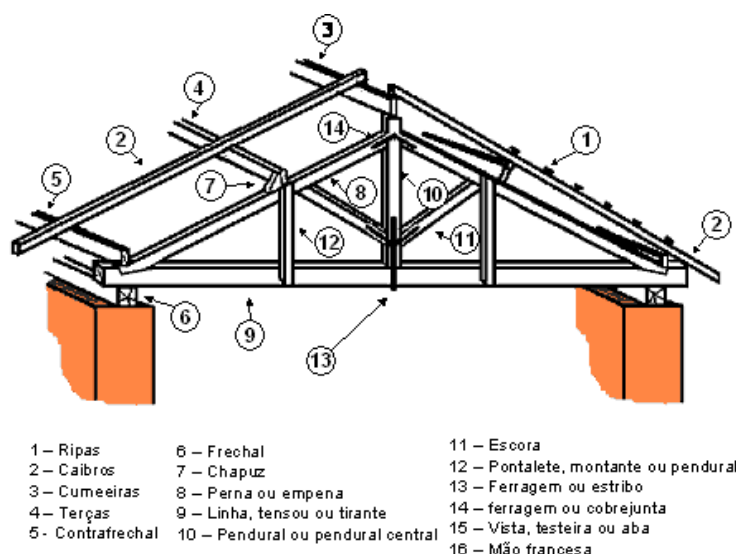


Fig. 2.3 - Esquema estrutural de uma cobertura inclinada, adaptado de (Gouveia, 2015)

Quanto à estrutura de suporte, esta pode ser classificada de três formas (Gouveia, 2015):

- Descontínua: Quando a estrutura contém todos ou parte dos elementos representados na Fig. 2.3
- Monolítica ou contínua.
- Elemento Autoportante: Estruturas com carácter mais atual de coberturas inclinadas, cujo revestimento inclui a estrutura, impermeabilização e isolamento térmico, funcionando como um sistema que devido aos seus constituintes e forma é capaz de suportar o seu peso próprio e as solicitações provocadas pela exposição ambiental.

Para um funcionamento adequado das coberturas inclinadas, é necessário ter em conta as seguintes exigências construtivas:

- Forma e volumetria;
- Inclinação, dependente da exposição ao vento, tipo de telha e regime de pluviosidade;
- Reação ao fogo, garantindo a segurança contra incêndios;
- Ventilação, assegurando a qualidade do ar no interior pela expulsão do vapor de água, garantindo, assim, a durabilidade dos materiais de construção da cobertura;

#### 2.1.4.1. REVESTIMENTOS

A parte superior das coberturas inclinadas são constituídas por elementos descontínuos, encaixados ou fixados mecanicamente, protegendo, desta forma, toda a estrutura e edifício contra os agentes externos como a radiação solar, a chuva e o vento. Estes elementos variam na sua dimensão, podendo ser chapas ou telhas, constituídos pelos seguintes materiais (Matias, 2002):

- Telhas (fixação por encaixe)
  - Cerâmicas
  - Aglomerado de cimento (telhas de betão)
  - Ardósia
  - Betuminosas
  - Aço



- Chapas (fixação mecânica)
  - Fibrocimento (não recomendável por questões de saúde pública)
  - Metálicas

#### 2.1.4.2. DESVÃO

Ao volume delimitado entre a cobertura e o teto do último andar de um edifício chamamos de desvão de uma cobertura inclinada, e pode ser caracterizado quanto ao uso como habitável ou não habitável, e para este último pode ainda ser qualificado como acessível ou não acessível.

#### 2.1.4.3. LOCALIZAÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO

Dependendo do tipo de utilização do desvão da cobertura e da constituição da última laje do edifício, ou seja, da laje da esteira, a localização do isolamento térmico tem diversas opções.

Na situação de desvão habitável, o isolamento térmico é normalmente aplicado segundo as vertentes da cobertura, em posição inferior ou superior as mesmas. A primeira corresponde à solução mais favorável para a durabilidade do isolamento térmico, permitindo a proteção deste contra a penetração de água entre as placas de revestimento pela ação do vento. No entanto, este tipo de método construtivo não permite a proteção da estrutura resistente das variações térmicas instigadas pela radiação solar, não existindo o aproveitamento da inércia térmica desta estrutura com benefício para a capacidade térmica da envolvente do edifício. (Gouveia, 2015)

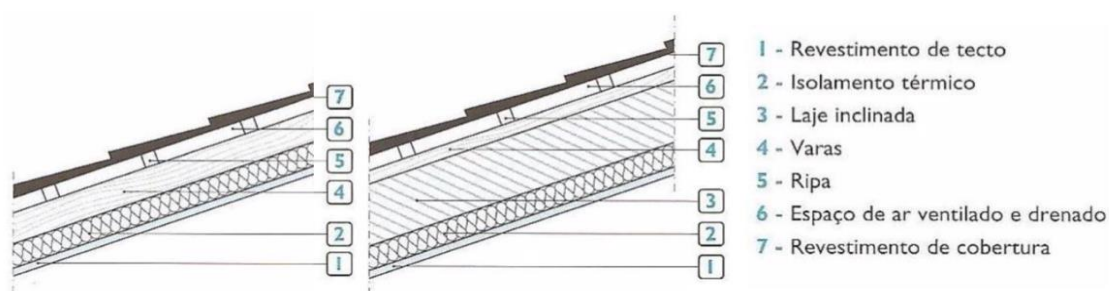


Fig. 2.4 - Localização do Isolamento térmico numa cobertura inclinada com desvão habitável, adaptado de (Novais, 2017)

No caso do desvão não habitável, é vantajoso a colocação do isolamento térmico segundo a laje de esteira, pois possibilita uma redução da área de aplicação do isolamento térmico, sendo economicamente preferível. É, desta forma, possível garantir uma boa ventilação do desvão não habitável, permitindo, durante a estação de arrefecimento, a dissipação de calor.

Em termos de posicionamento em relação à laje de esteira, é preferível o assentamento do isolamento térmico na zona superior, pois garante benefícios no comportamento térmico da envolvente, na medida que não compromete a inércia térmica. Apesar do desvão ser não habitável, pode ser acessível, sendo necessária a colocação de um revestimento de piso. (J. Aguiar e J. V. Paiva, 2006)

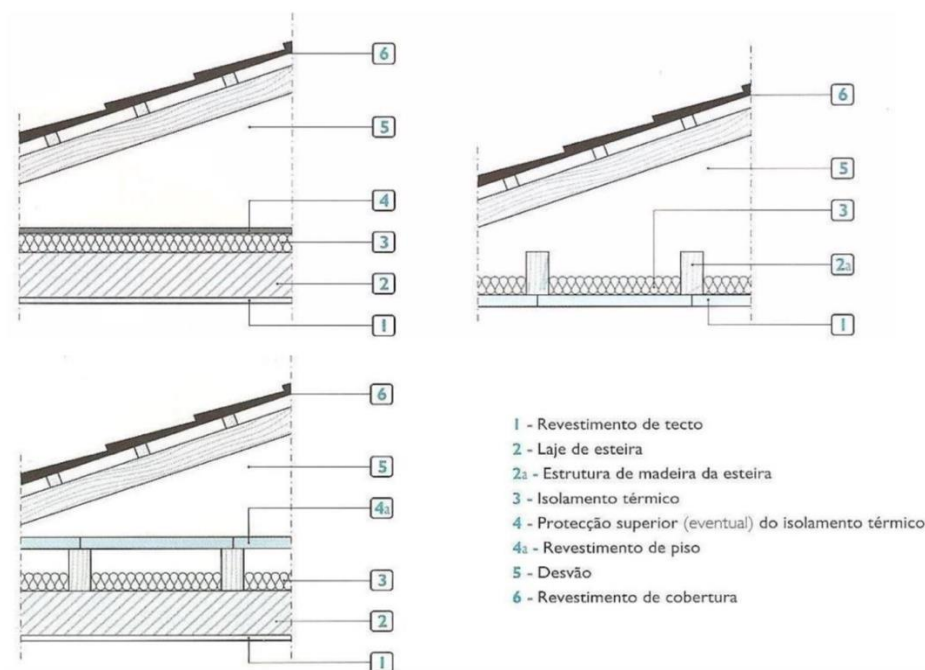


Fig. 2.5 - Localização do isolamento térmico numa cobertura inclinada com desvão não habitável, adaptado de (Novais, 2017)

## 2.1.5. COBERTURAS PLANAS

Quando os materiais que compõem a cobertura se encontram muito próximos da horizontal, com uma inclinação média de 5% (normalmente variando entre 1% e os 5%, como referido anteriormente), designa-se como cobertura plana em terraço ou horizontais. No sentido de garantir o escoamento das águas pluviais, a pendente mínima requerida para estas coberturas é de 1% para situações correntes, no entanto não existe um valor máximo para este parâmetro em Portugal. Em países como a Bélgica este valor pode variar até aos 10%, chegando, mesmo, aos 17,5% em Inglaterra. (Gouveia, 2015)

Este tipo de solução construtiva permite a utilização da cobertura para lazer ou ajardinados, contribuindo, desta forma, para a valorização do edifício, o que não acontece no caso das coberturas inclinadas. (Mascarenhas, 2003), (J. G. Lopes, 1994)

### 2.1.5.1. CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE COBERTURA PLANA

Um sistema de cobertura plana contém diversas camadas, com várias funções, permitindo que as exigências funcionais requeridas para este elemento sejam satisfeitas.

É possível também caracterizar este tipo de coberturas em relação ao tipo de acessibilidade e também em relação à localização do isolamento térmico.

### 2.1.5.2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ACESSIBILIDADE

A cobertura não acessível tem como principal requisito a proteção do sistema de impermeabilização aos agentes externos a que o elemento seja exposto. Nestas coberturas apenas têm acesso pessoas para realizar alguns trabalhos de manutenção quando necessário, encontrando-se preparados caminhos de circulação próprios para fazer face a solicitações não previstas.

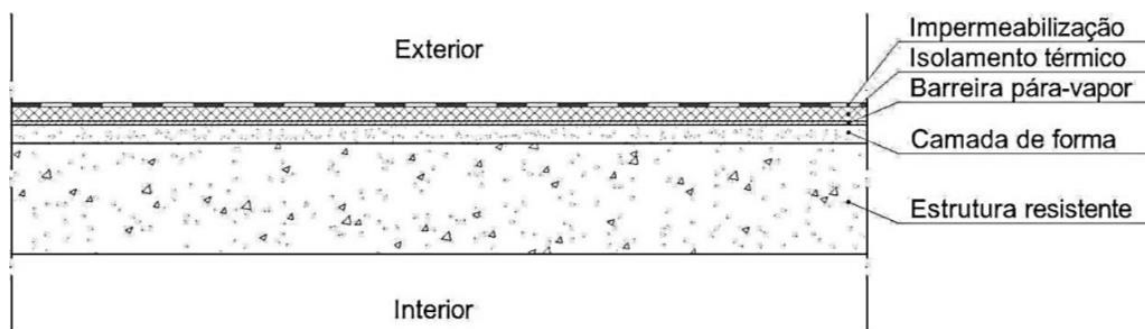


Fig. 2.6 - Cobertura não acessível, adaptado de (Gouveia, 2015)

No caso de coberturas acessíveis a pessoas, esta possui uma capacidade de carga superior relativamente à anterior, uma vez que contém um revestimento com uma camada de proteção pesada e uma camada de dessolidarização com o intuito de uniformizar as deformações garantindo assim a proteção do sistema de impermeabilização

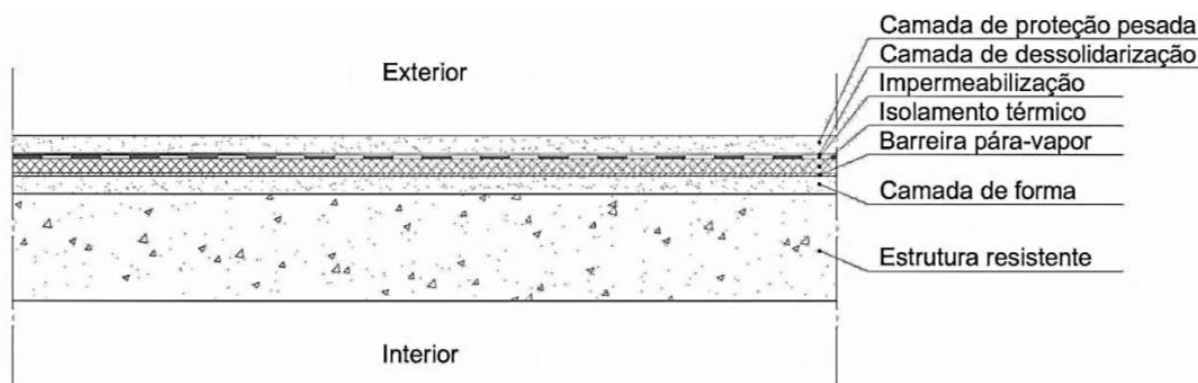


Fig. 2.7 - Esquema de cobertura acessível a pessoas, adaptado de (Gouveia, 2015)

Nas coberturas acessíveis podemos distinguir entre o acesso a pessoas ou veículos, e dentro do último, veículos ligeiros ou pesados, intensificando as solicitações mecânicas sofridas pela cobertura. A camada de proteção é seleccionada considerando as novas circunstâncias.

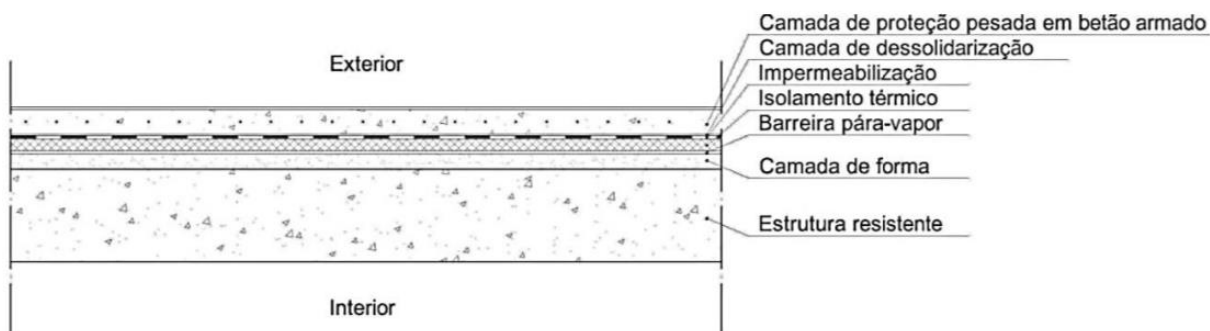


Fig. 2.8 - Esquema de cobertura acessível a veículos ligeiros ou pesados, adaptado de

Relativamente às coberturas especiais, que incluem as coberturas em jardim e coberturas para equipamentos industriais, estas transmitem solicitações muito intensas para as coberturas, quer pela presença de cargas muito elevadas, quer pela acumulação de humidades, quer pelas vibrações provocadas pelos equipamentos industriais.

#### 2.1.5.3. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CAMADA DE PROTEÇÃO DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Dependendo do tipo de proteção de impermeabilização, por norma a camada superior de uma cobertura, as coberturas planas podem ser classificadas, nas classes: sem proteção, proteção leve aplicada em fábrica ou aplicada em obra, e por fim, proteção pesada rígida ou com material solto.

É importante referir que nas coberturas sem proteção, a camada de impermeabilização fica mais exposta aos agentes naturais e mecânicos, sendo que necessitam de exigências de comportamentos mais rigorosos para manterem as suas características ao longo do tempo de vida. (Gouveia, 2015)

#### 2.1.5.4. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À LOCALIZAÇÃO DA CAMADA DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Nas coberturas horizontais, o isolamento térmico, pode estar localizado das três seguintes formas: na zona superior, intermédia ou inferior em relação às restantes camadas.

Atualmente, a opção mais utilizada coloca o isolamento térmico na posição intermédia, por cima da camada de forma, e funcionando como suporte da impermeabilização, ou entre a esteira horizontal e a camada de forma, sendo esta a chamada cobertura tradicional (mas com isolamento). (J. G. Lopes, 1994)

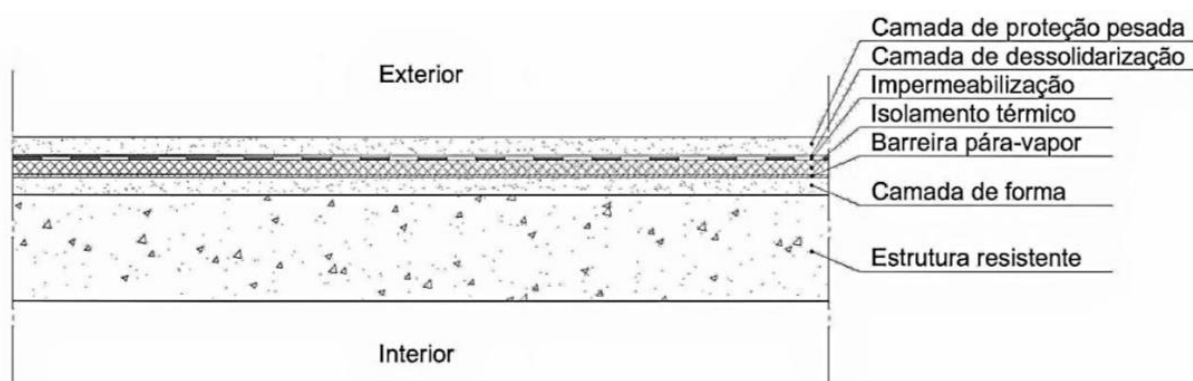


Fig. 2.9 - Esquema de cobertura com isolamento térmico intermédio, cobertura tradicional, acessível a pessoas, adaptado de

Caso o isolamento térmico esteja localizado na zona superior, em relação às restantes camadas, denominado como cobertura invertida, permite obter vantagens para a vida útil do mesmo na medida em que protege a camada de impermeabilização de grandes amplitudes térmicas da ação direta do sol. (Gouveia, 2015)

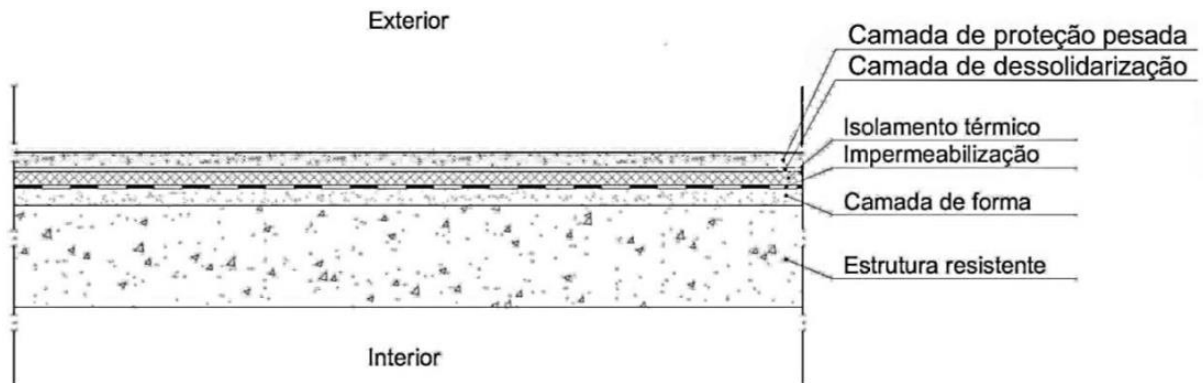


Fig. 2.10 - Esquema de cobertura invertida, adaptado de

Por fim, o isolamento térmico pode ser colocado na base da estrutura resistente da cobertura, aderente a esta ou ao teto falso. De todas, é a solução menos vantajosa, pois desfavorece a inércia térmica da estrutura e não contribui para a proteção de deformações de origem térmica.

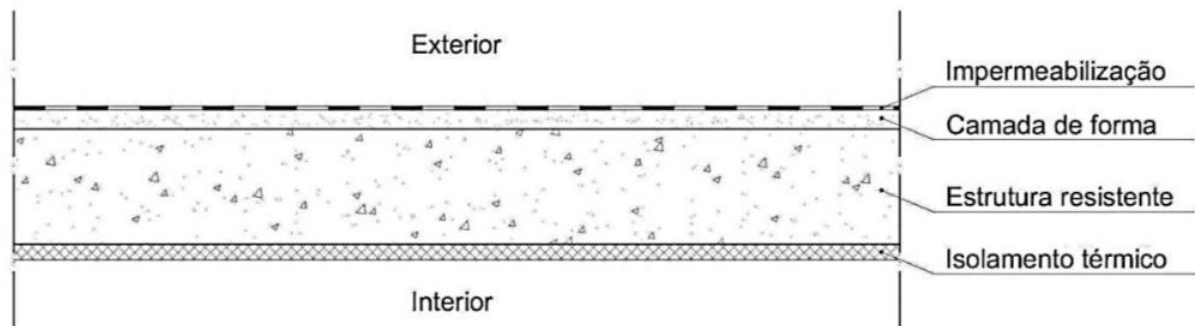


Fig. 2.11 - Esquema de cobertura com isolamento térmico aplicado sob a estrutura resistente, adaptado de

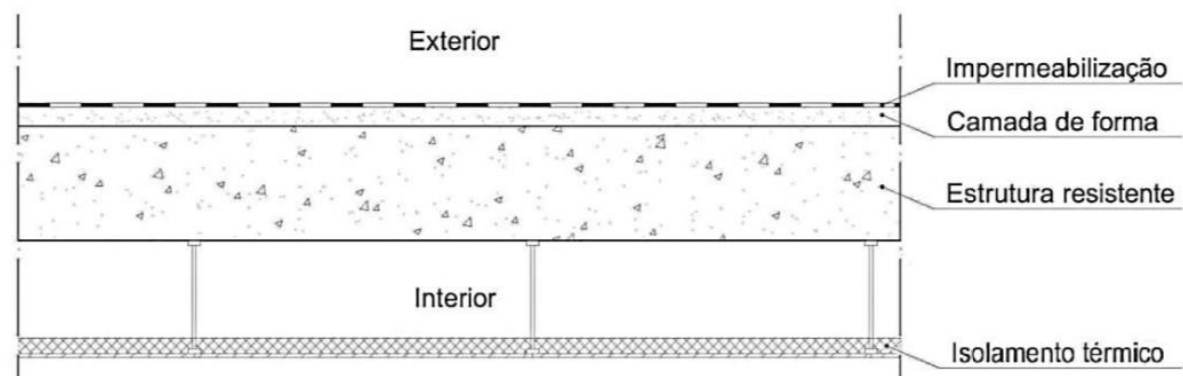


Fig. 2.12 - Esquema de cobertura com isolamento térmico sobre o teto falso, adaptado de

#### 2.1.5.5. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À PENDENTE

Tal como já foi referido, o limite mínimo para a pendente de coberturas planas é de 1%, no entanto é exigido que nesse caso estejam garantidas as condições de escoamento de água permitindo um bom

funcionamento da mesma. A pendente máxima está estreitamente ligada ao tipo de utilização, bem como aos materiais usados no revestimento. Em coberturas acessíveis a pessoas a circulação não pode ser comprometida utilizando-se, assim, valores de pendentes bem próximos do limite mínimo. De igual forma acontece quando se utilizam materiais de revestimento pesados soltos, ou misturas betuminosas muito fluidas aplicadas na impermeabilização. (J. G. Lopes, 1994)

Desta forma, para a classificação de coberturas quanto à sua pendente, utiliza-se a classe I para inclinações mais suaves, evoluindo até à classe IV para inclinações mais severas.

## **2.2. HUMIDADE, CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES E CONDENSAÇÕES ENTRE CAMADAS DO ELEMENTO CONSTRUTIVO**

O aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, resulta no desenvolvimento de várias formas de degradação do edifício, com consequências, por vezes, graves. Este fenómeno pode ter origem na ocorrência de condensações internas. A ocorrência deste fenómeno depende da constituição dos elementos construtivos e das condições climáticas existentes nos ambientes exterior e interior. Ao entrar em contacto com superfícies mais frias, a humidade absoluta do ar atinge o limite de saturação para a temperatura em causa, ocorrendo, desta forma, condensações.

O comportamento do ar húmido depende da sua temperatura e da quantidade de vapor de água que contenha, denominada por humidade absoluta –  $U$  – expressa em  $g/m^3$  ou  $kg/kg$ . Este vapor de água, exerce uma determinada pressão designada por pressão parcial –  $P_p$  – expressa em Pa, sendo tanto maior quanto mais vapor de água existir. A quantidade de vapor de água que uma unidade de ar pode conter é limitada, sendo que acima desse valor o ar já não tem mais capacidade de absorver vapor de água, condensando as quantidades em excesso. Ao valor limite de humidade absoluta designa-se por limite de saturação –  $W_s$  – a que corresponde uma pressão limite designada por pressão de saturação –  $O_s$ . A humidade relativa –  $H_r$  – traduz < relação percentual entre a quantidade de vapor de água que existe por unidade de ar e o respetivo limite de saturação, ou a relação equivalente entre a pressão parcial e a pressão de saturação. (Ferreira Duarte, 2010)

O limite de saturação (e a respetiva pressão de saturação) não são constantes, variando com a temperatura. Assim se explica que o ar aumenta de humidade relativa quando arrefece (uma vez que diminui o limite de saturação), e diminui a humidade relativa quando aquece, no entanto, em ambos os casos, a humidade absoluta mantém-se constante. Nestas condições, sempre que o ar entra em contacto com materiais dos elementos construtivos mais frios, o valor da humidade absoluta ultrapassa o limite de saturação ocorrendo saturações.

O diagrama psicrométrico expressa as relações existentes entre as humidades absoluta e relativa e a temperatura do ar, como o exemplo da Fig. 2.13:

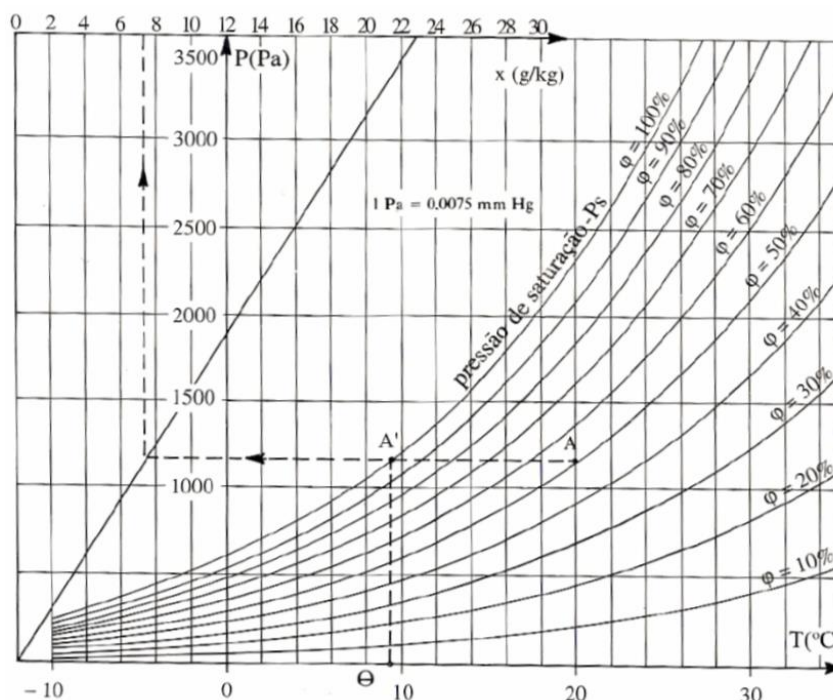


Fig. 2.13 - Diagrama psicrométrico, adaptado de (Ferreira Duarte, 2010)

O diagrama apresentado na Fig. 2.13 permite perceber mais facilmente os conceitos supramencionados. Em abcissas temos os valores da temperatura do ar (em °C), nas ordenadas os valores da humidade absoluta (em g/m<sup>3</sup>) e da pressão de saturação (em Pa) e um conjunto de curvas de humidade relativa (em %). Horizontalmente podemos observar linhas que representam pontos com igual humidade absoluta, verticalmente temos pontos com igual temperatura. Cada uma das curvas do diagrama psicrométrico é constituída por pontos de igual humidade relativa.

#### 2.2.1.5.CONDIÇÕES EXTERIORES

As condições exteriores têm um papel fulcral na qualidade e características do ar interior. Quanto maior for o fluxo de ar exterior que penetra num edifício maior será esta influência. Se o ar que entra tiver um menor valor de humidade absoluta, o valor da humidade relativa baixa.

Se no interior e exterior de um edifício a humidade relativa tiver igual valor havendo, no entanto, uma diferença de temperatura, quando o ar exterior penetra dentro de um edifício sendo aquecido, a sua humidade relativa diminui e assim a mistura terá um valor mais baixo do que na situação inicial. (Ferreira Duarte, 2010)

Como nota informativa, a Fig. 2.14, procura caraterizar o clima do nosso país.

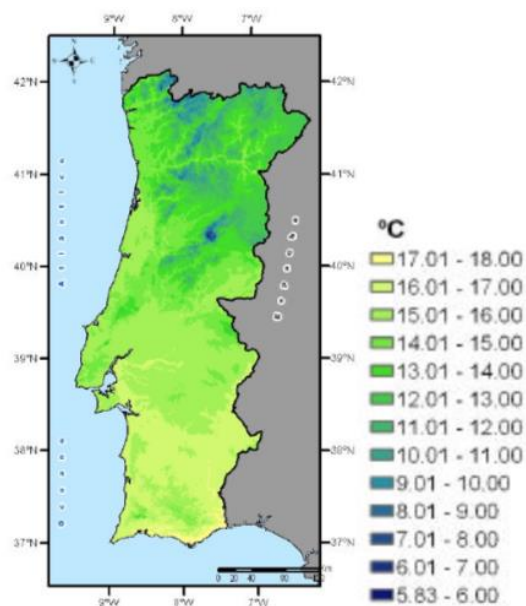


Fig. 2.14 - Mapa de temperaturas médias anuais em Portugal continental, adaptado de (Ferreira Duarte, 2010)

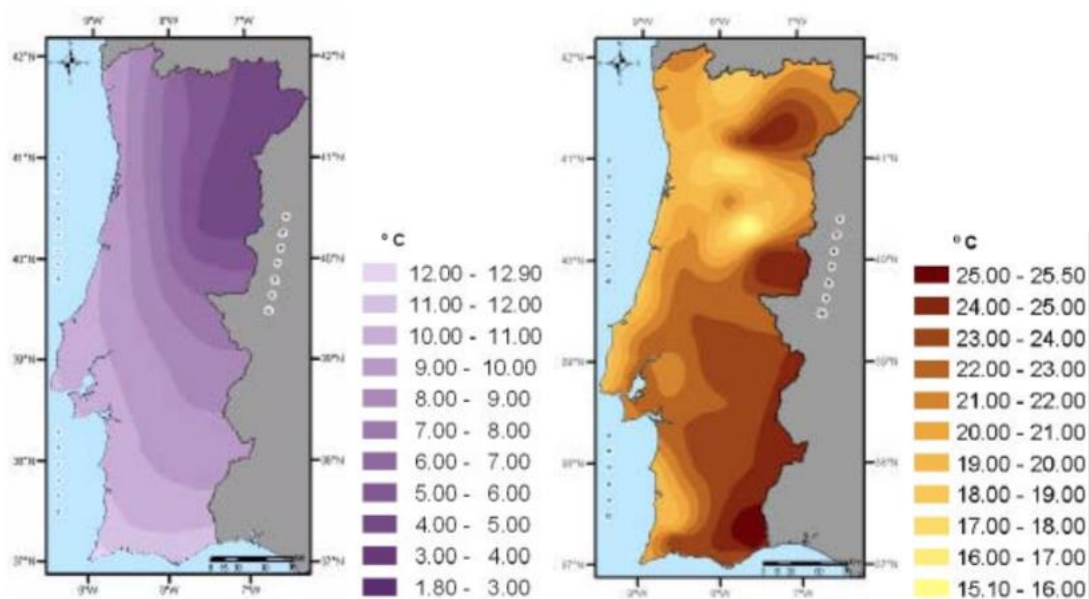


Fig. 2.15 - Mapa de temperaturas médias mensais em Portugal continental nos meses de janeiro e Julho respetivamente



# 3

## SUSTENTABILIDADE E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

### 3.1.SUSTENTABILIDADE

#### 3.1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos gases que causam o agravamento do efeito de estufa. Por sua vez, este fenómeno provoca a maior ameaça ambiental do século XXI que são as alterações climáticas. Este gás é libertado para a atmosfera quando os combustíveis fósseis – a principal fonte de energia do mundo – são queimados.

Em 1959, acontece a primeira medição de concentração de dióxido de carbono, em Mauna Loa, no Havaí. Nesse ano, o resultado das medições de concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi de 316 partes por milhão. Na Fig. 3.1 e Fig. 3.2 podemos observar a representação da taxa de crescimento médio anual de CO<sub>2</sub> e a concentração atmosférica deste gás, respetivamente, em Mauna Loa. A Fig. 3.3 representa a situação global face à mesma situação. Pelos resultados, concluímos que os valores ultrapassam os 400 ppm, um crescimento enorme, com tendência para se agravar, sendo previsível que em 2050 este valor possa atingir os 550 ppm. Os padrões de crescimento económico de países menos desenvolvidos e mais populosos, como a China e a Índia, são uma das principais razões para este agravamento. (Novais, 2017)

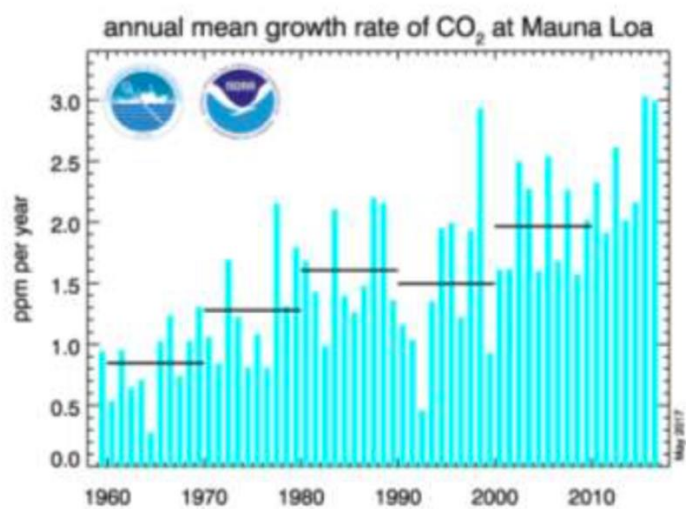


Fig. 3.1 - Taxa de crescimento médio anual de CO<sub>2</sub>, adaptado de (Novais, 2017)

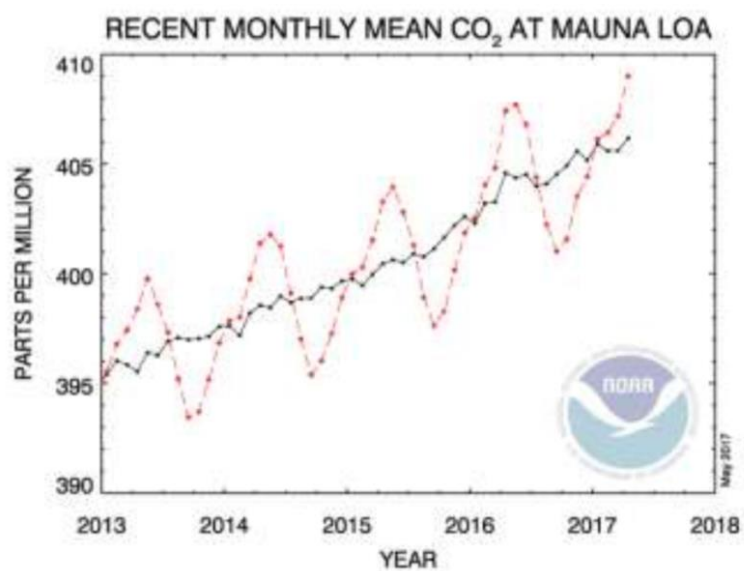


Fig. 3.2 - Concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> em Mauna Loa (Novais, 2017)

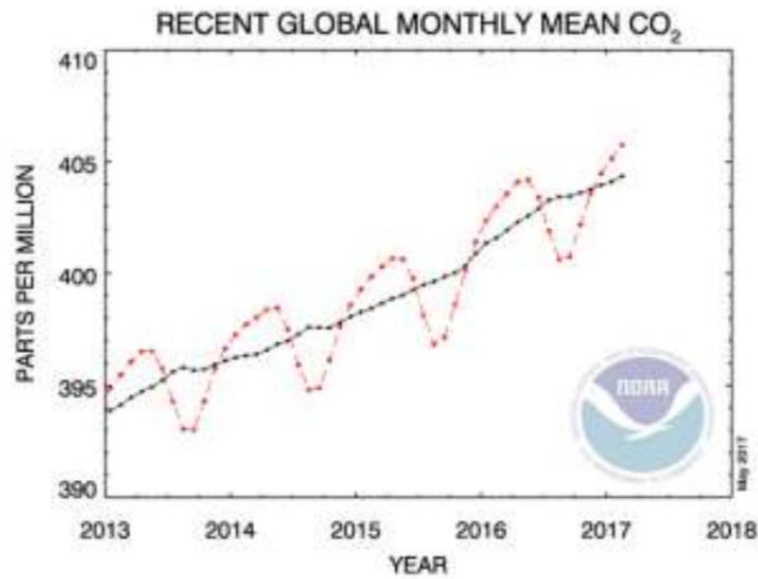


Fig. 3.3 - Concentração atmosférica global de CO<sub>2</sub> (Novais, 2017)

O aumento da temperatura média do ar, problema urgente com o qual se depara o nosso planeta, é causado pela cada vez maior elevada concentração de CO<sub>2</sub>. A Fig. 3.4 seguinte, apresenta forte relação entre o aumento brusco da concentração de CO<sub>2</sub> e da temperatura.

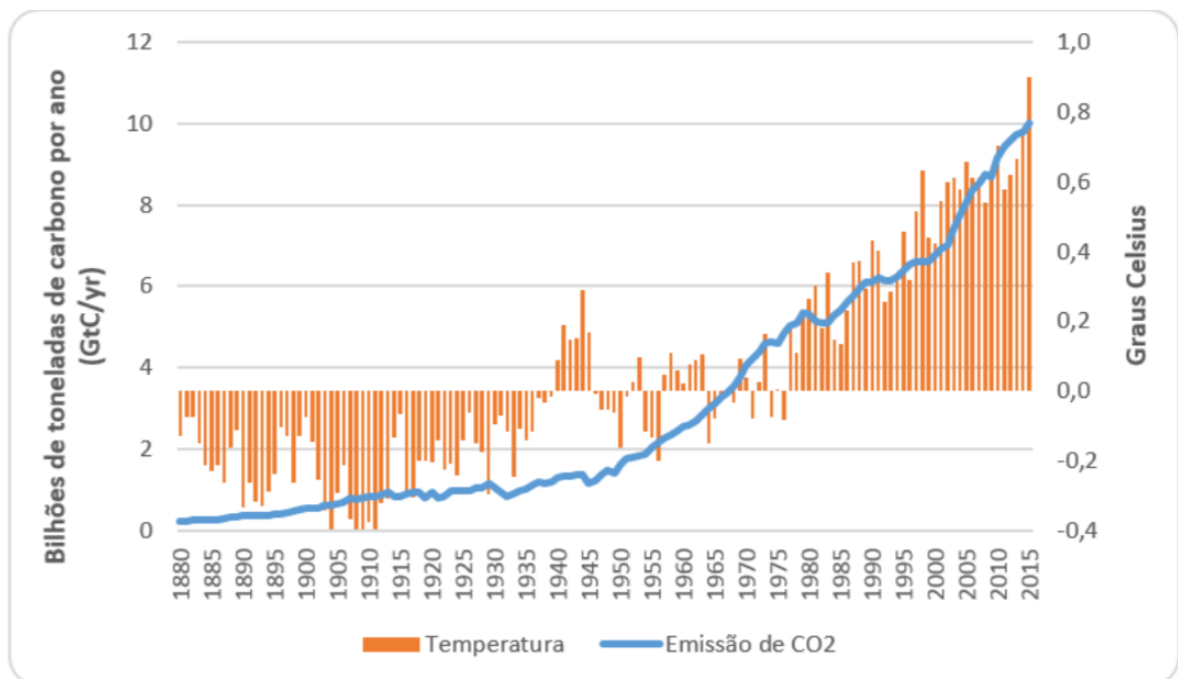


Fig. 3.4 - Aquecimento global e emissões de CO<sub>2</sub> entre 1880 e 2015

### 3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

É extremamente necessário reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), pois, para além do aumento de CO<sub>2</sub>, verifica-se que outros gases como o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e o metano (CH<sub>4</sub>) também estão a crescer significativamente. Todavia, observa-se uma notória redução da concentração de clorofluorcarbonetos (CFC's) nos últimos anos. Estes gases, em quantidades normais são essenciais para a preservação da existência de vida na Terra, na medida em que controlam a temperatura do planeta, mantendo-a em níveis ótimos para todos os seres nele existentes. O problema é que estes gases tem aumentado a uma velocidade tal que provocam um aumento exagerado da temperatura, resultando, desta forma, numa mudança de clima. **A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** reúne as diversas evoluções da concentração de cada gás de efeito de estufa (GEE) ao longo dos anos e o Quadro 3.1 - Contribuição dos GEE para o efeito de estufa, adaptado de indica qual a sua contribuição para o efeito de estufa.

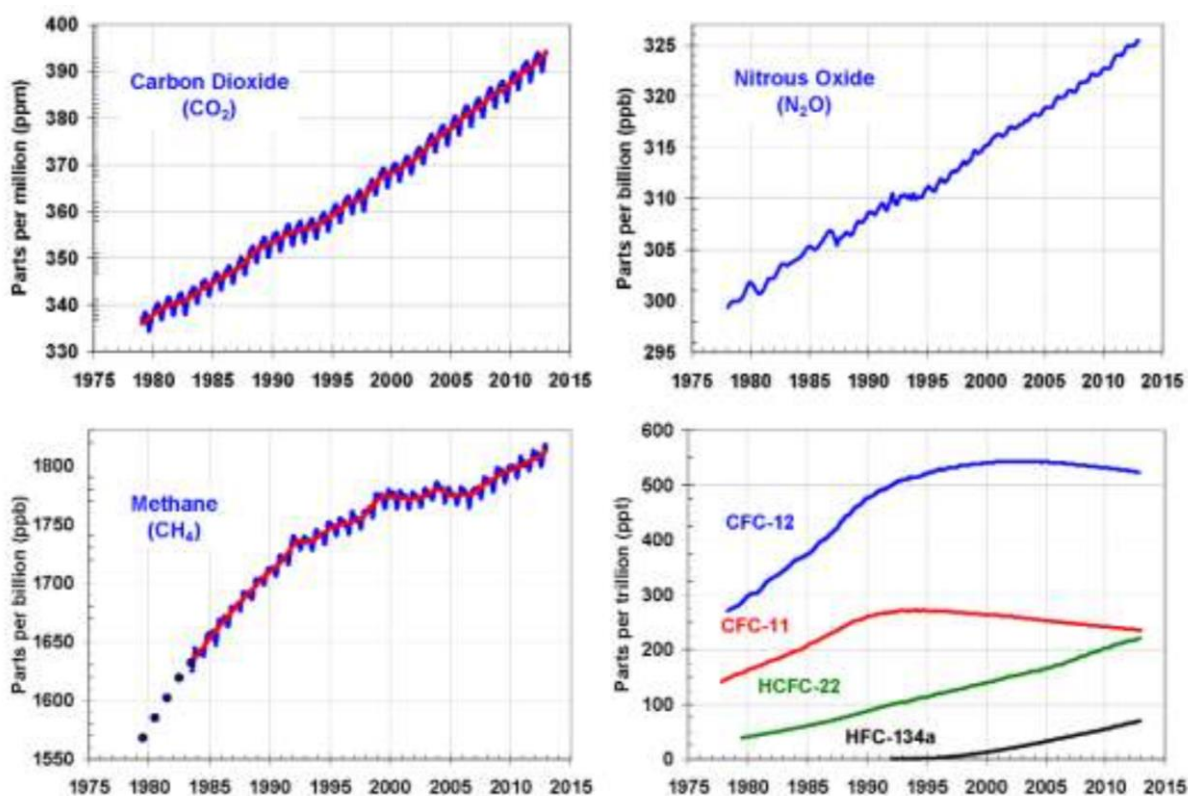


Fig. 3.5 - Concentração dos diversos GEE ao longo dos anos (Novais, 2017)

GEE	Contribuição para o efeito de estufa	Exemplos de fontes de emissão antropogénicas
CO <sub>2</sub>	60%	Combustíveis fósseis e destruição florestal

CH <sub>4</sub>	20%	Produção e consumo de energia, águas residuais, aterros sanitários
N <sub>2</sub> O	6%	Fertilização, queima de biomassa e combustíveis fósseis
Outros compostos	14%	Aerossóis, espumas expandidas e solventes

Quadro 3.1 - Contribuição dos GEE para o efeito de estufa, adaptado de (Novais, 2017)

Os fatores de risco elevado para a preservação da biodiversidade são:

- O aumento da população mundial;
- Os elevados índices de urbanização;
- A exagerada exploração de recursos, que tem como consequência uma maior produção de resíduos;
- As alterações climáticas;

Desta forma, a limitação da produção de gases com efeito de estufa (GEE) constitui o princípio básico para a minimização dos impactos ambientais da atividade humana.

### 3.2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A definição de desenvolvimento sustentável é alvo de grande discussão e tem sofrido algumas alterações ao longo do tempo. Em 1987 a Comissão Mundial do Ambiente e Desenvolvimento de Brundtland, criou a primeira noção sobre este tema, publicando um relatório intitulado de “O nosso futuro comum” onde se afirma que “o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades” (S. Jalali e F. P. Torgal, 2010). Desde esta altura, o conceito “desenvolvimento sustentável” tem sido cada vez mais discutido, como mostra a Fig. 3.6:

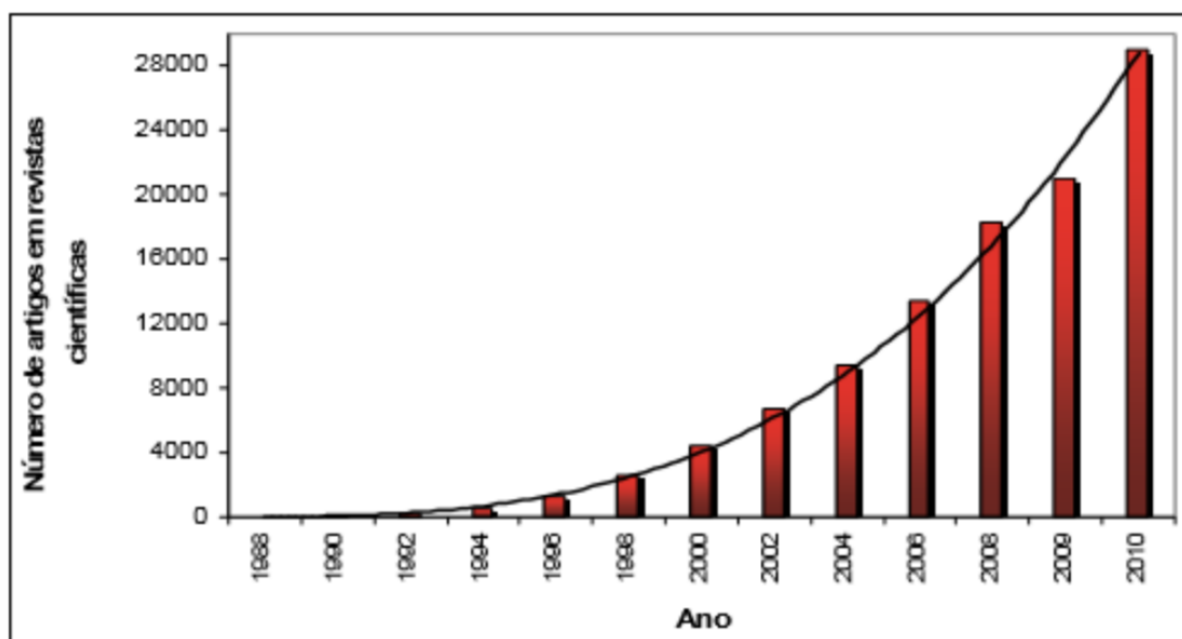


Fig. 3.6 - Evolução do número de artigos em revistas internacionais contendo as palavras " desenvolvimento sustentável" como palavras-chave

Uma sociedade sustentável é aquela que atenta numa linha de desenvolvimento económico e que, sem prejudicar o ambiente, proporciona aos seus cidadãos os bens e serviços para garantir uma vida com qualidade à geração presente e às gerações futuras (Novais, 2017). Estes são os pilares do desenvolvimento sustentável, presentes na Fig. 3.7:



Fig. 3.7 - Pilares do desenvolvimento sustentável (Novais, 2017)

O projeto Agenda 2030 foi criado para garantir um desenvolvimento sustentável no futuro, e é resultado do trabalho de um conjunto de governos e cidadãos de todo o mundo, de forma a criar um modelo global que permita cumprir os 17 objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Portugal foi um país que teve uma participação importante no processo de criação desta Agenda, afirmando-se, principalmente, na defesa de objetivos de promover sociedades pacíficas e inclusivas.

Apesar de tudo, Portugal apresenta algumas condicionantes relativamente ao assunto Desenvolvimento Sustentável, tais como:

- Património natural e de biodiversidade em risco;
- Dependência energética excessiva;
- Deficiente gestão de recursos hídricos;
- Elevados níveis de emissão de gases responsáveis pelo efeito de estufa (GEE);

Portugal e a União Europeia assinaram o acordo Portugal 2020, no qual se define a política de desenvolvimento económico, social e territorial para promover o desenvolvimento sustentável entre 2014 e 2020, primando pelo crescimento inteligente, sustentável e inclusivo.

O conceito “pegada ecológica” está aliado à ideia de sustentabilidade, e foi criada com o objetivo de ajudar a entender a quantidade de recursos naturais que são necessários para suportar o nosso estilo de vida. Este conceito é expresso em hectare global, e pode ser definido como a superfície terrestre necessária para gerar recursos e para absorver os resíduos de um indivíduo ou edifício.

Portugal é considerado deficitário na sua capacidade de fornecer recursos naturais face às atividades desenvolvidas pelo ser humano. A pegada *per capita* em Portugal é de 3,9 hectares globais e a bio capacidade é de 1,5 sendo esta a quantidade de área biologicamente produtiva que está disponível para atender às necessidades da humanidade (Novais, 2017). Portugal é dos países com maior défice ambiental de todo o mundo, com uma diferença de 2,4 hectares globais, o que significa que a pegada ecológica excede em 160% a bio capacidade. A Fig. 3.8 mostra o cenário a uma escala global no que responde à pegada ecológica e a biodiversidade. Representando o aumento e diminuição dos mesmos, respetivamente:

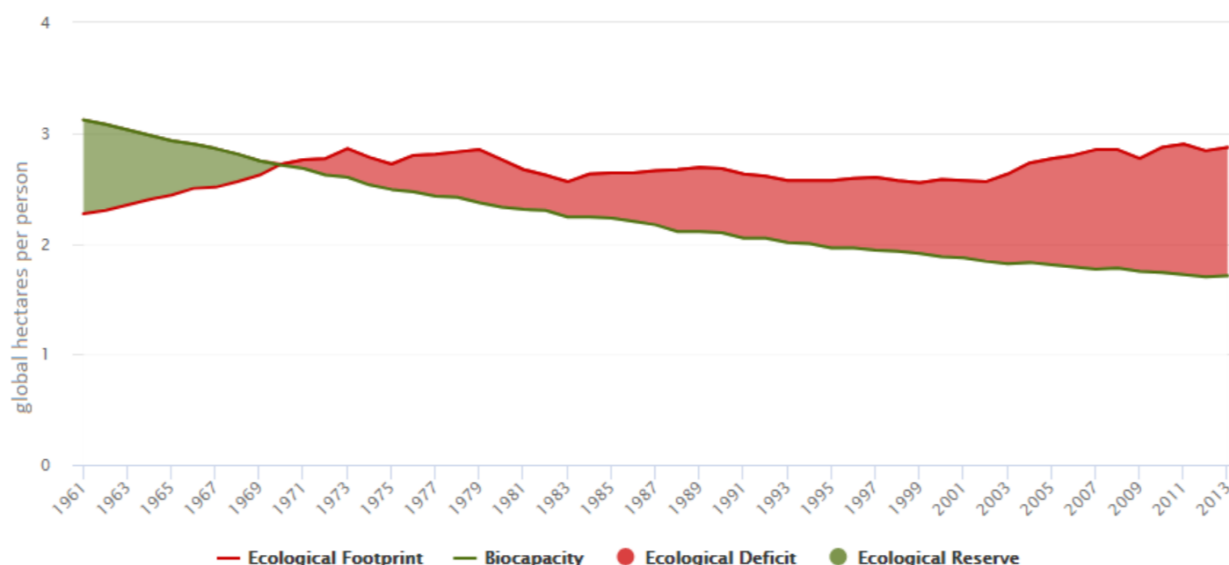


Fig. 3.8 - Pegada ecológica e bio capacidade no mundo entre 1961 e 2013 (Novais, 2017)

É assim de extrema importância mudar o rumo no que respeita à sustentabilidade, uma vez que o planeta é a fonte de tudo aquilo que necessitamos para viver. É importante o esforço de cada cidadão, no entanto as ações políticas e das empresas é crucial. Devemos, portanto, ter em conta que o desenvolvimento sustentável se alia ao facto de que os ecossistemas mantêm as sociedades que geram a economia, e que a sustentabilidade social e económica só é viável com um planeta saudável.

### 3.2.2.CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL

Charles Kibert criou o conceito de “construção sustentável”, definindo-o como “a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”. O CIB (*International council for Research and Innovation um Buildings and Construction*) apresentou sete princípios que contribuem para a construção sustentável, os quais são aplicados durante todo o ciclo de vida da construção (Mateus, 2009):

- Reduzir – Redução do consumo de recursos;
- Reutilizar – incremento da reutilização de recursos;
- Reciclar – Utilização de materiais reciclados e recicláveis;
- Natureza – Proteção do ambiente natural
- Resíduos tóxicos – Eliminação dos produtos tóxicos;
- Qualidade – Assegurar a qualidade;
- Economia – Analisar os custos do ciclo de vida;

Outra definição para construção sustentável é apresentada pela Organização de Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), considerando que um edifício sustentável é aquele que minimiza os impactes sobre o ambiente natural e construído, que à escala do edifício e da sua envolvente, como também à escala regional e global (Fernandes, 2013).

O projeto “*Sustainable Buildings*” definiu cinco prioridades para que uma construção se considere sustentável (Mateus, 2009):

- Uso eficiente de recursos;
- Eficiência energética (incluindo a redução dos GEE);
- Prevenção da poluição (incluindo a qualidade do ar interior e a diminuição do ruído);
- Harmonização com o ambiente (incluindo a Avaliação do Impacte Ambiental)
- Abordagem integrada e sistémica dos diversos aspetos da construção relacionados com o desenvolvimento sustentável;

Apesar das múltiplas definições que possa apresentar, o conceito de construção sustentável assenta sempre nas três dimensões da sustentabilidade, que são: social, económica e ambiental. Com base nestes princípios, apresenta-se na Fig. 3.9 as prioridades que são consideradas por Mateus os pilares da construção sustentável:



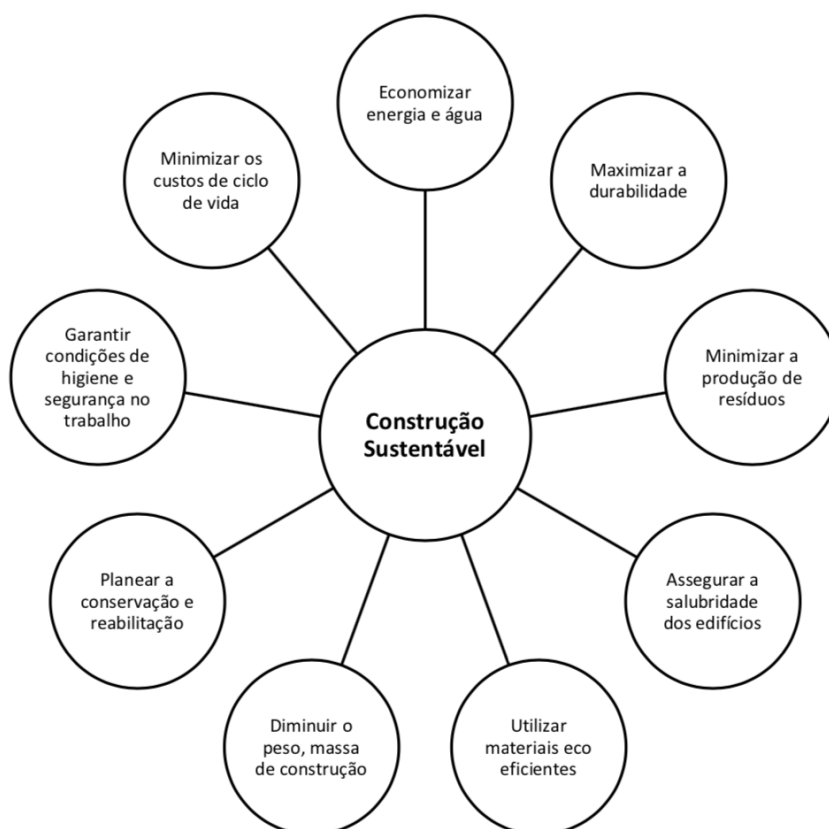


Fig. 3.9 - Prioridades da construção sustentável (Novais, 2017)

### 3.2.3.IMPACTES AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO

Um impacte ambiental pode ser entendido como o “conjunto de alterações favoráveis e desfavoráveis produzidas em parâmetros ambientais e sociais, num determinado período de tempo e numa determinada área, resultantes da realização de um projeto, comparadas com a situação que ocorreria, nesse período de tempo e nessa área, se esse projeto não viesse a ter lugar” (Pinheiro, 2006).

A ocupação e uso do solo, o consumo de recursos bem como a produção de resíduos estão desde logo associados a uma situação ambiental, que podem provocar uma alteração dos ecossistemas naturais.

O Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), considera que os impactes ambientais, e também sociais, com maior importância no sector da construção de edifícios são os seguintes (Mateus, 2009):

- Extração de matérias-primas, associada ao esgotamento dos recursos naturais;
- Alteração do tipo de uso do solo, incluindo a diminuição da biodiversidade;
- Produção de ruído;
- Utilização de recursos energéticos e respetivas emissões de gases com efeito de estufa;
- Outras emissões exteriores e interiores;
- Degradação do aspeto estético das cidades;
- Utilização de água e produção de águas residuais;
- Crescimento das necessidades de transporte (dependendo do planeamento urbanístico);

- Vários efeitos derivados do transporte dos materiais de construção;
- Produção de resíduos;
- Desmembramento de comunidades;
- Risco de saúde nos estaleiros de construção e para os ocupantes dos edifícios;

No setor da construção, quer as atividades construtivas bem como o seu ciclo de vida estão diretamente relacionadas com as três dimensões da sustentabilidade, apresentadas anteriormente. O ciclo de vida das construções é dos maiores comparando com outras indústrias, como por exemplo a farmacêutica (20 anos) ou a de softwares (6 meses), e tem início na fase de concessão de projeto terminando na fase de demolição, passando pela fase de utilização, fase esta a que estão associados os maiores benefícios da construção. Todavia, em termos de impactos ambientais, claramente as fases de construção e de demolição são as mais significativas, sendo, por isso, necessário avaliar todas as fases, pois todas têm a sua importância. Em cada fase de ciclo de vida estão associados diversos impactos, como apresentado na Fig. 3.10 (Novais, 2017):

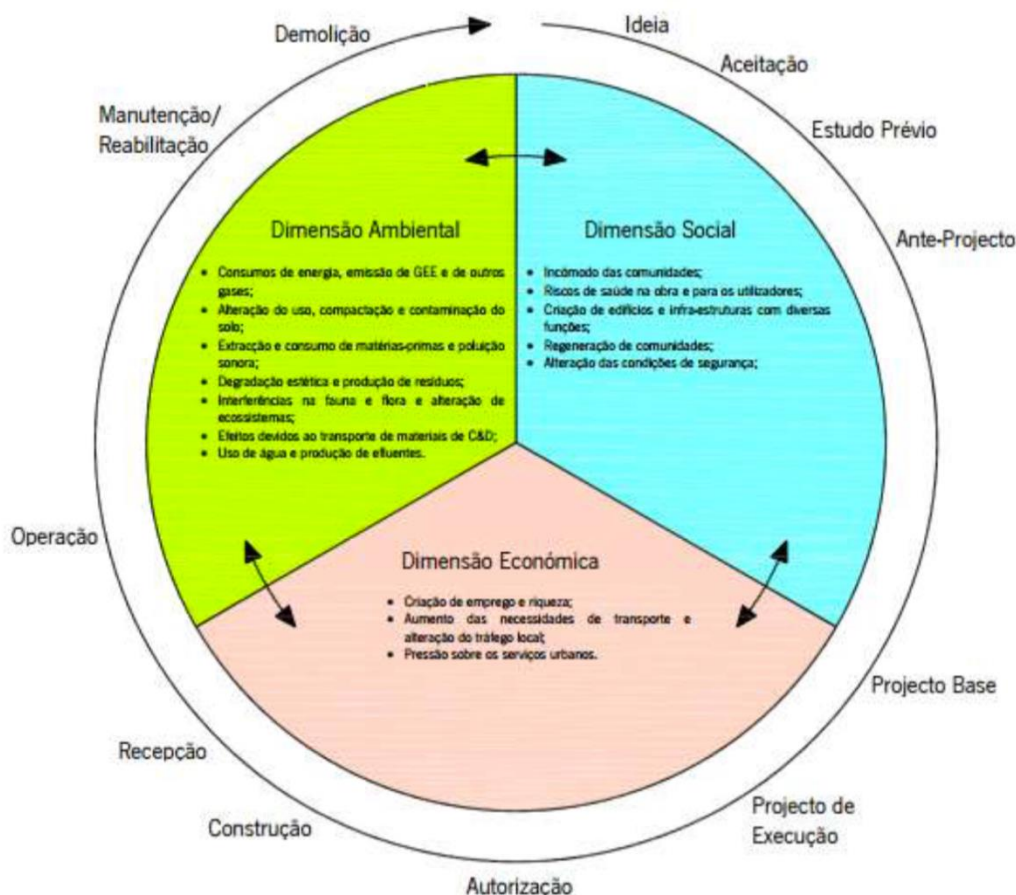


Fig. 3.10 - Impactes do ciclo de vida das construções 28/02/2020 04:42:00

## 3.2.4. MEDIDAS SUSTENTÁVEIS A APLICAR

É possível observar que têm sido aplicadas medidas e políticas que promovem a sustentabilidade na construção. Posto isto, as principais soluções observadas, bem como as ferramentas que as tornam possíveis encontram-se descritas no Quadro 3.2:

Fases do processo de construção	Aceitação até ao projeto de execução	Construção	Utilização	Demolição
Políticas e medidas	<p>Incorporação da sustentabilidade nos códigos e normas;</p> <p>Promoção de metodologias consensuais de apoio à conceção de construções sustentáveis;</p> <p>Promoção da sustentabilidade nas obras públicas;</p> <p>Formação adequada das equipas de projeto; Atribuição de prémios a projetos-piloto; taxas bonificadas para acesso ao crédito;</p> <p>Prémios de seguros menos elevados;</p> <p>Planeamento da utilização do solo;</p> <p>Zonamento do território;</p> <p>Regulamentos (eficiência energética P.E)</p>	<p>Benefícios fiscais na aquisição de materiais e equipamentos mais sustentáveis;</p> <p>Análise de todos os custos com materiais; leis de trabalho e normas que promovam a sustentabilidade nos trabalhos de construção;</p> <p>Implementação de sistema de gestão da qualidade; saúde e ambiente nos estaleiros.</p>	<p>Benefícios fiscais na aquisição de equipamentos mais sustentáveis; Formação adequada dos utilizadores; promoção de metodologias consensuais de avaliação e certificação da sustentabilidade;</p> <p>Taxas bonificadas no IML; Análise de todos os custos; Implementação de sistema de gestão ambiental.</p>	<p>Regulamentos acerca do tratamento dos resíduos de construção (reciclagem, incineração e deposição em aterros);</p> <p>Taxas (no caso da deposição e incineração)</p>
Ferramentas	<p>Avaliação do ciclo de vida (LCA); Avaliação dos custos de ciclo de vida (LCC);</p> <p>Metodologias de apoio à conceção de</p>	<p>Declaração ambiental de produtos; ISO 14000; ISO 9000</p>	<p>Etiquetagem/certificação da sustentabilidade;</p> <p>Auditorias energéticas.</p>	

construções  
sustentáveis.

Quadro 3.2 - Políticas, medidas e ferramentas que promovem a construção sustentável, adaptado de (Mateus, 2009)

Executar uma obra, tendo em atenção o uso eficiente de energia, da água, e também, o uso de materiais certificados e renováveis contribui francamente para um melhor desempenho ambiental. Deste modo, a Quadro 3.3 apresenta medidas que promovem uma maior sustentabilidade.

Uso eficiente de energia	Uso eficiente de água	Uso de materiais sustentáveis
Utilização de iluminação de baixo consumo;		
Utilização de acionadores com sensores de presença;		Uso de materiais saudáveis;
Aproveitamento da luz natural disponível;	Utilização de equipamentos eficientes;	Uso de materiais isolantes;
Utilização de sensores de luz natural e regulação de fluxo;	Aproveitamento das águas residuais;	Uso de materiais com baixa energia incorporada;
Adoção de cores claras;	Segurança no uso de águas recicladas;	Uso de materiais duráveis;
Utilização de coletores solares;		Uso de materiais reciclados e/ou recicláveis;
Uso de equipamentos eficientes;		Uso de materiais locais;
Integração de energias renováveis;		

Quadro 3.3 - Medidas que promovam a sustentabilidade, adaptado de (Novais, 2017)

### 3.3.AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

#### 3.3.1.ENQUADRAMENTO

Para progredir, no que à sustentabilidade diz respeito, é necessário uma utilização apropriada de materiais, produtos e tecnologias construtivas que contribuam notavelmente para um melhor desempenho ambiental de ciclo de vida de um edifício (*Avaliação do ciclo de vida\_R\_Mateus\_Luís\_Bragança0002.pdf*, [2011]).

É necessário a existência de um método que permita avaliar o ciclo de vida dos produtos levando a que haja uma melhor seleção que conduza a uma maior eficiência ecológica.

Desta forma, é necessário conhecer bem os elementos e a sua durabilidade, bem como a avaliação do seu ciclo, para saber se estes satisfazem completamente os requisitos de desempenho aos quais devem cumprir.

### 3.3.2.OBJETIVO E PROPÓSITO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ou *Life Cycle Assessment* (LCA), é um procedimento analítico que tem como objetivo avaliar o conteúdo em recursos e os impactes ambientais associados ao ciclo de vida de um produto manufaturado. As aplicações mais importantes das ferramentas do LCA são:

- Análise da contribuição das diversas fases do ciclo de vida para o impacte ambiental global. Esta aplicação tem por objetivo a definição de prioridades nos processos de seleção de materiais ou produtos;
- Comparação entre produtos para comunicação interna ou externa;

Bragança refere que *“a utilização adequada de materiais, produtos e tecnologias construtivas pode contribuir consideravelmente para um melhor desempenho ambiental de ciclo de vida de um edifício e, por conseguinte, para a sua sustentabilidade”* . (Avaliação do ciclo de vida\_R\_Mateus\_Luís\_Bragança0002.pdf, [s.d.])

A *International Organization for Standardization* (ISO) é responsável pela regulamentação da metodologia ACV, em Portugal, através das normas ISO14040 e ISO 14044, que definem os requisitos específicos e diretrizes para uma avaliação do ciclo de vida de um produto (e aqui entra qualquer bem ou serviço, que diga respeito à indústria da construção). Nestes documentos normativos, a ACV é vista como *“uma compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactes ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”*. (Novais, 2017)

No setor da construção civil, as aplicações mais importantes das ferramentas de ACV são:

- Quantificação dos potenciais impactes ambientais associados ao ciclo de vida de um produto;
- Identificação da energia, materiais consumidos, e resíduos libertados para o meio ambiente;
- Usado na implementação de medidas que permitam melhorar o desempenho ambiental;
- Comparação entre produtos para a comunicação interna ou externa;

Os estudos de ACV na indústria da construção analisam impactes ambientais que se podem categorizar como:

- Consumo de recursos não renováveis e de água;
- Potencial de aquecimento global, de redução da camada do ozono, da eutrofização, de acidificação, e de formação de *smog*, ou nevoeiros tóxicos;
- Toxicidade humana e ecológica;
- Produção de resíduos;
- Uso de terra;
- Poluição do ar
- Alteração de habitats;

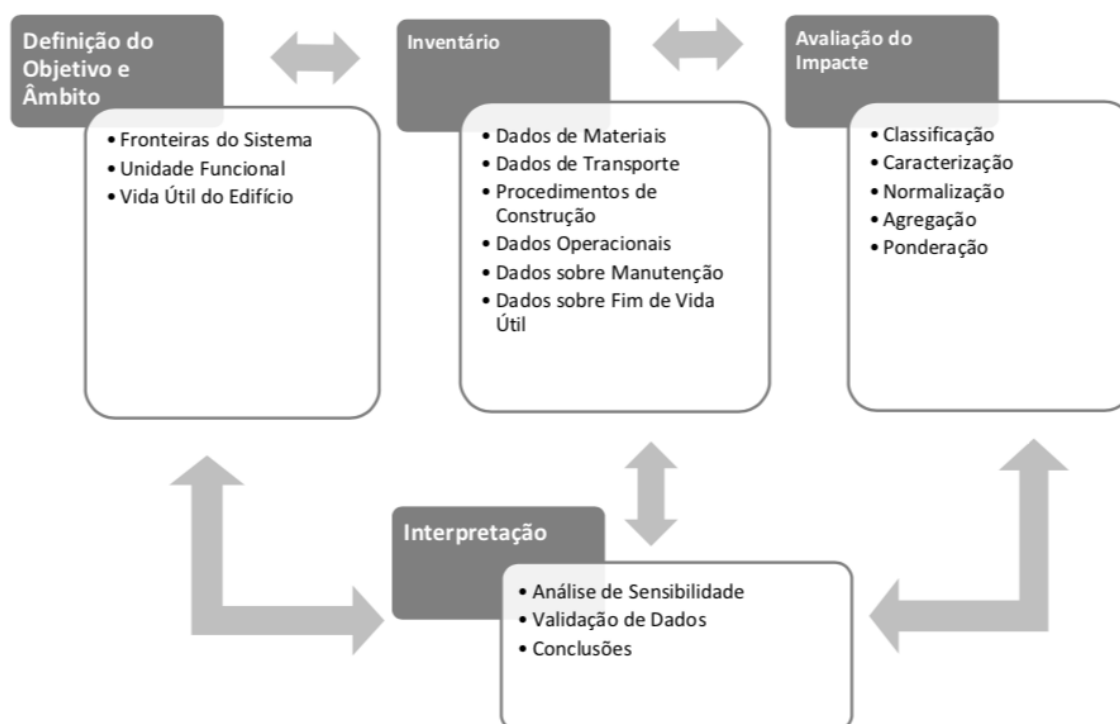
Devido ao facto da indústria da construção utilizar inúmeros materiais numa obra, e pelo facto de existirem diversos intervenientes, a adoção da ACV é uma tarefa que acarreta períodos de implementação longos, dificultando a difusão deste método na maioria dos projetos. Para além disso, é

um método caro, e, devido à extensa base de dados sobre os materiais e serviços que necessita, bastante complexo, o que faz com que as empresas (principalmente as de menor dimensão) não o utilizem.

### 3.3.3. ETAPAS DE REALIZAÇÃO DE UMA ACV

#### 3.3.3.1. ENQUADRAMENTO

A implementação da ACV é constituída por quatro fases, que simplificam a realidade, sendo estas independentes e o resultado de uma pode influenciar na execução da próxima e, até corrigir esta, se for necessário. O Quadro 3.4 apresenta as quatro fases descritas anteriormente:



Quadro 3.4 - Fases de implementação da ACV na indústria da construção (Gouveia, 2015)

#### 3.3.4. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO

A primeira fase de um ACV compreende a definição do objetivo e âmbito, onde é explicado o nível de detalhe e a aplicação pretendida, os motivos para a realização do estudo, a que se destinam os resultados obtidos, e qual o público alvo.

Na primeira fase, o objeto de estudo é utilizado sobre a forma de unidade funcional, sendo habitualmente adotado um metro quadrado (1 m<sup>2</sup>) de área para assegurar compatibilidade entre todas as situações.

#### 3.3.5. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

O inventário do ciclo de vida (ICV) é a segunda fase da metodologia. Nesta fase é realizada uma listagem e uma contagem de todas as variáveis envolvidas no estudo, como matérias-primas, energia, transporte, emissões, resíduos, entre outros. Resumindo, os dados necessários para se atingir os objetivos propostos

na primeira fase. De acordo com a *International Organization for Standardization*, esta é a fase “da avaliação do ciclo de vida que envolve a compilação e quantificação de entradas e saídas para um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida” (Novais, 2017).

A realização de um ICV é um processo iterativo. Conforme são angariados novos dados e o conhecimento sobre o sistema é melhor, podem ser identificadas limitações ou novos requisitos que obriguem a uma alteração de procedimento, de forma a alcançar o objetivo estabelecido na etapa anterior. Em casos extremos, pode ser necessário alterar o objetivo e o âmbito de estudo.

As várias etapas do ICV são apresentadas na Fig. 3.11:

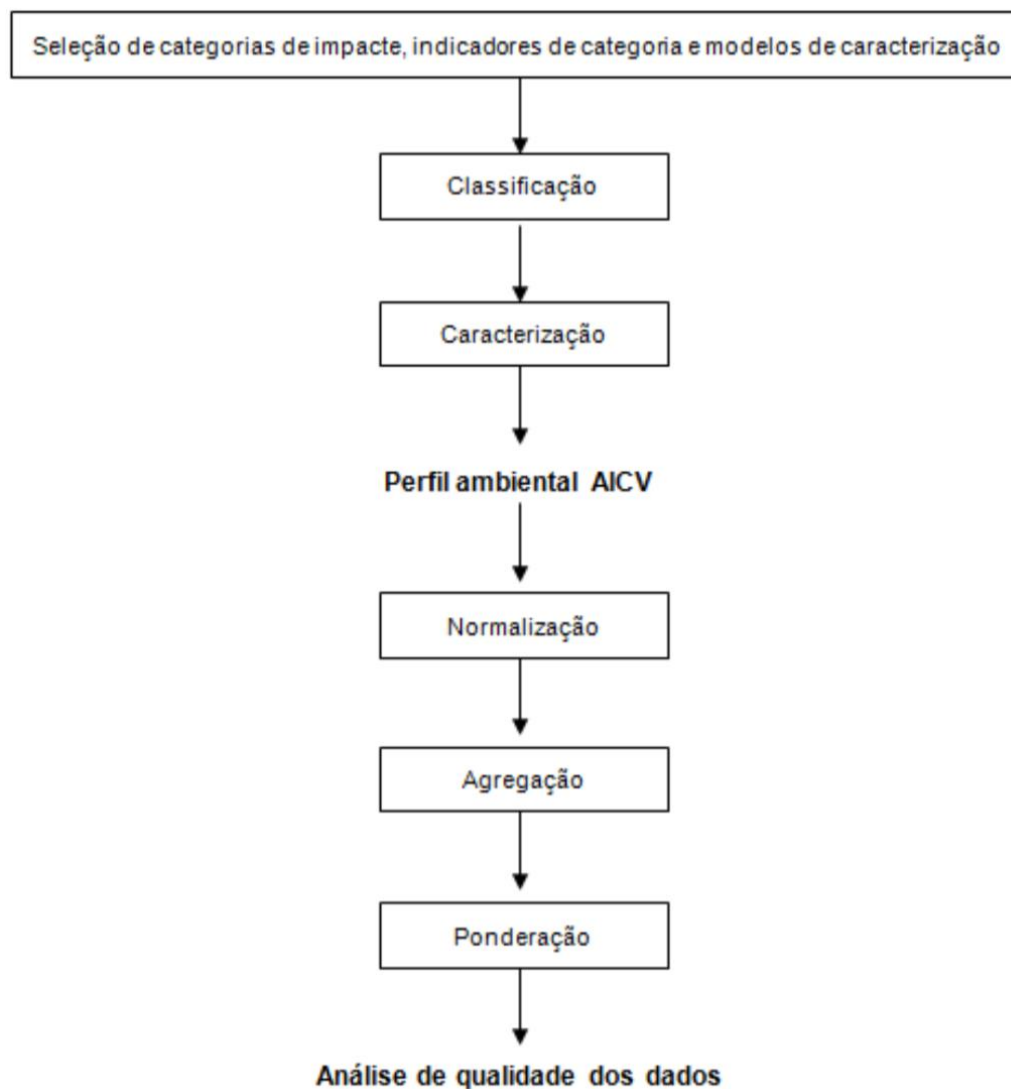


Fig. 3.11 - etapas do ICV (Novais, 2017)

Os *inputs*, ou dados de entrada, possuem diversas informações sobre as etapas do ciclo de vida de um produto, tais como a energia utilizada no seu fabrico, os materiais usados, produtos, coprodutos,

resíduos, emissões e outros aspetos ambientais. A determinação do tipo e quantidade de materiais num edifício é um dos principais *inputs*.

### 3.3.6. AVALIAÇÃO DE IMPACTE DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida é a terceira fase da ACV, e tem como objetivo avaliar os potenciais impactes ambientais, através dos dados recolhidos do inventário de ciclo de vida (ICV).

Uma AICV é composta por elementos obrigatórios e opcionais. Um estudo que não inclua as etapas obrigatórias é intitulado apenas por inventário do ciclo de vida, ou *Life Cycle Inventory* (LCI), e não uma ACV (Gouveia, 2015).

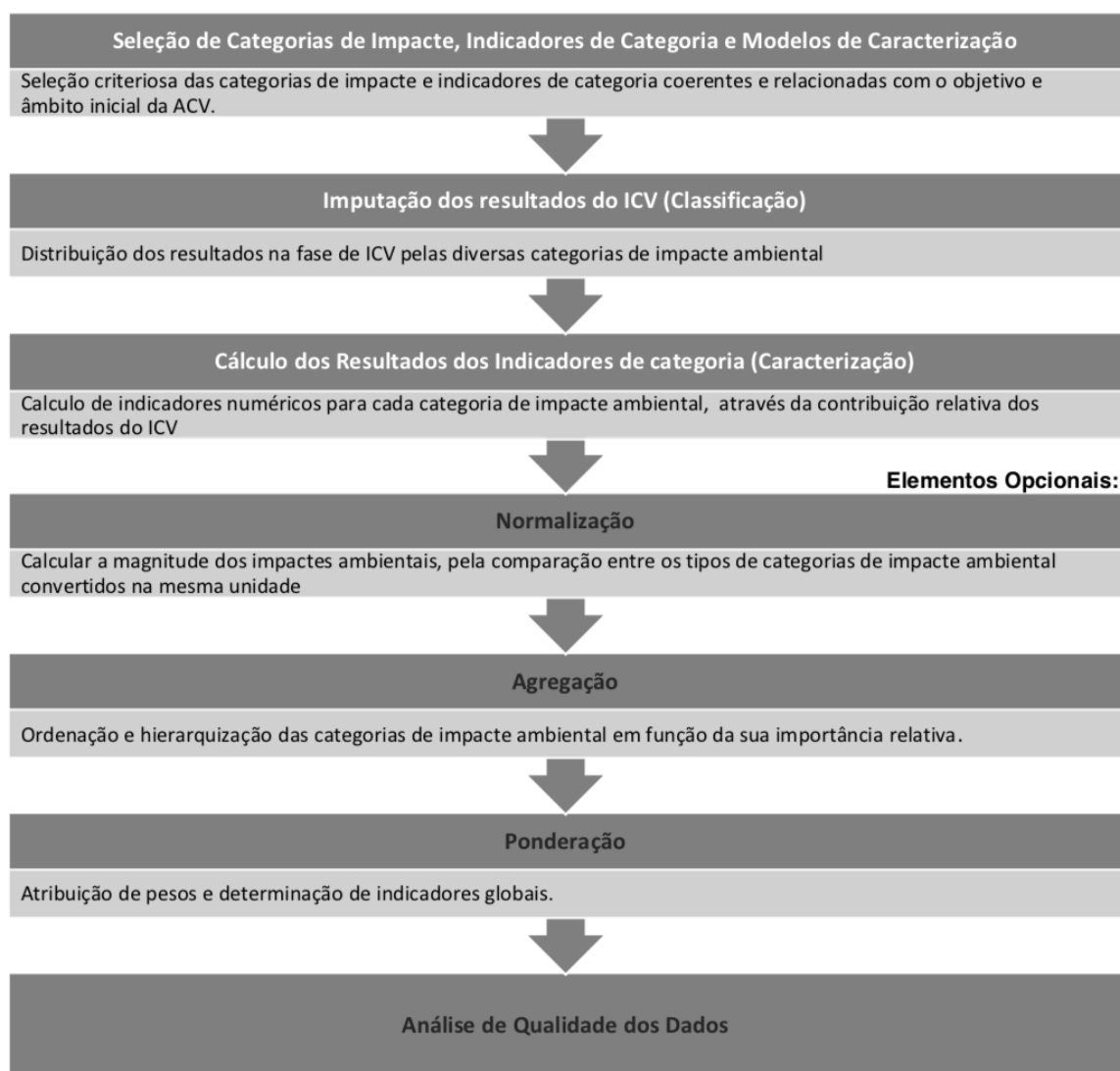


Fig. 3.12 - elementos da fase do IACV (Gouveia, 2015)



De forma a permitir uma comparação entre resultados da aplicação do método o Comité Europeu de Normalização (CEN) padroniza as categorias de impacto ambiental, expressas na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**:

Impactes Ambientais em Categorias de ACV	Esgotamento de Recursos Abióticos	ADP	Impactes Ambientais em ICV	Utilização de Energia Primária Não Renovável	ENR
	Potencial de Aquecimento Global	GWP		Utilização de Energia Primária Renovável	
	Destruição da Camada de Ozono Estratosférico	ODP			
	Acidificação do Solo e Recursos Hídricos	AP			
	Formação de Ozono Troposférico	POCP			
	Eutrofização	EP			

Fig. 3.13 - Categorias de impacto ambiental

### 3.3.7.INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A interpretação do Ciclo de Vida é a fase onde, segundo as diretrizes da ISO 14044, “ os resultados, quer do inventário, quer da avaliação de impacto, ou de ambas são avaliados relativamente ao objetivo e âmbito definidos, com vista à obtenção de conclusões e recomendações” {Citation}.

### 3.3.8.VARIANTES DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser adaptadas diferentes etapas do ciclo de vida de um produto, ou construção, podendo ser divididas em três possibilidades, conforme a Fig. 3.14:

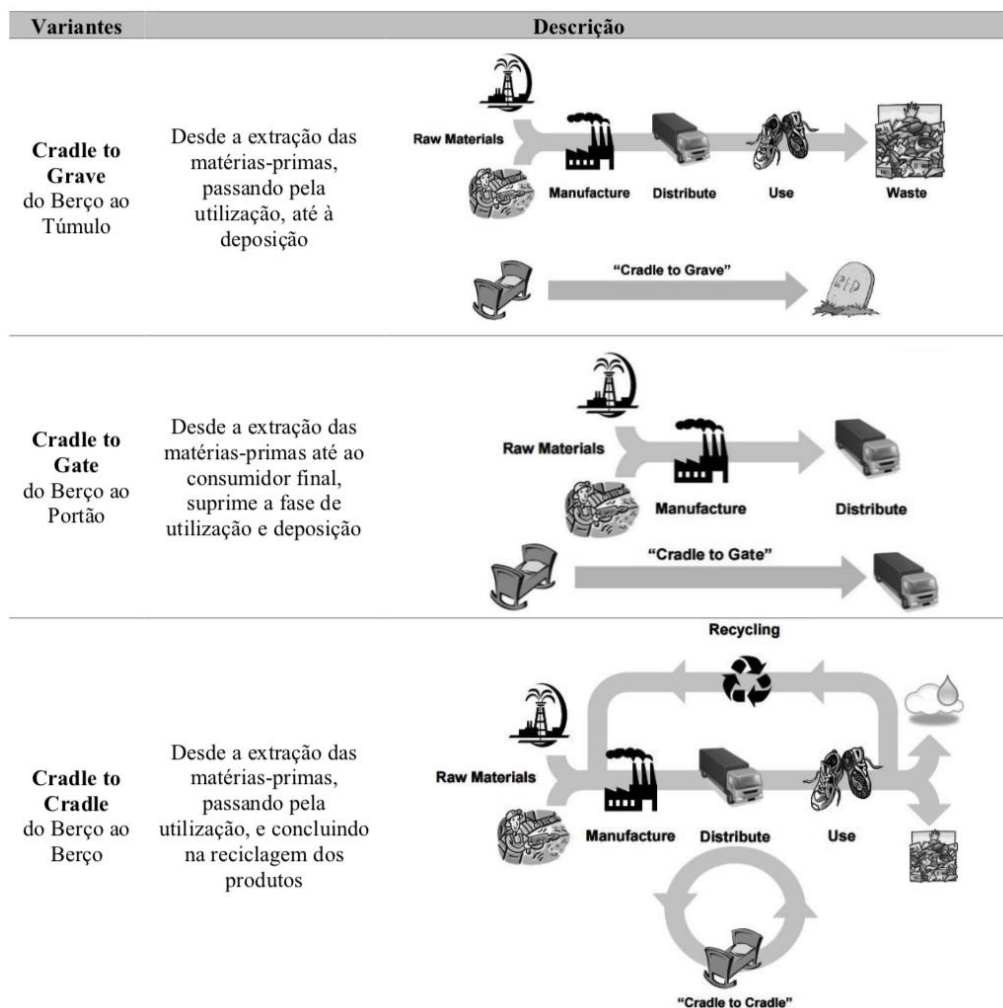


Fig. 3.14 - Variantes do ACV (Gouveia, 2015)

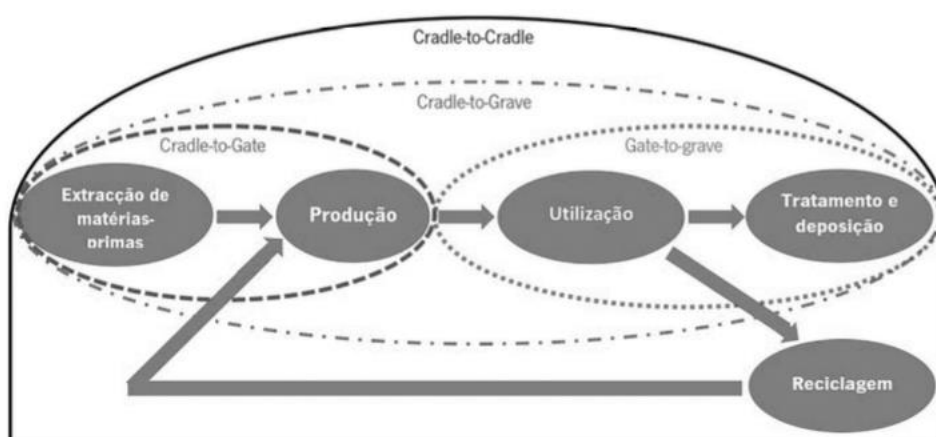


Fig. 3.15 - Fases do ciclo de vida incluídas nas variantes da ACV (Gouveia, 2015)

## 3.3.9. QUANTIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTE AMBIENTAL

Nesta dissertação serão utilizadas as mesmas categorias de impacto ambiental que são aplicadas por Mateus e Bragança, encontrando-se estas descritas no Quadro 3.5, bem como as unidades em que são expressas.

Categorias de impacto ambiental		Descrição	Unidade
ADP	Potencial de diminuição das reservas de recursos bióticos	Onde é avaliado a preservação dos ecossistemas e a exploração de recursos naturais existentes na terra, atmosfera e mar. Exprime-se em quilogramas de antimónio (Sb) equivalentes por quilograma (Kg) de recurso extraído.	Kg Sb eq
GWP	Potencial de Contribuição para Aquecimento Global	É analisado a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera para um horizonte de 100 anos (GWP100), e incorpora a escala temporal para remoção da substância da atmosfera. Exprime-se em quilogramas equivalentes de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) por quilograma (Kg) de emissão libertada para a atmosfera.	Kg CO <sub>2</sub> eq
ODP	Potencial de destruição da camada do ozono	Examina a quantidade de radiação de UV-V que atinge a superfície terrestre e destrói a camada de ozono estratosférico, com impactos vários incluindo a afetação da durabilidade e desempenho dos materiais de construção. Expressa-se em quilogramas equivalentes de triclórofluormetano (CFC-11) por quilograma de emissão numa escala de tempo infinita.	Kg CFC-11 eq
AP	Potencial de acidificação	Permite avaliar a quantidade de emissões de amónia (NH <sub>3</sub> ), dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ), e óxido de azoto (NO <sub>x</sub> ) que se convertem em compostos acidificantes, formando partículas ácidas ou chuvas ácidas. Expressa-se em quilogramas equivalentes de SO <sub>2</sub> por cada quilograma de emissões para atmosfera.	Kg SO <sub>2</sub> eq
POCP	Potencial de formação de ozono troposférico	Permite avaliar a oxidação fotoquímica, resultante da ação da radiação ultravioleta sobre óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> ), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV's). Esta categoria é expressa em quilogramas equivalentes de etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) por quilograma de emissão.	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq

EP	Potencial de eutrofização	Esta categoria está associada às emissões de azoto (N) e fósforo (P), resultando em fertilização excessiva de ecossistemas. É expressa em quilogramas equivalentes de fosfato (PO <sub>4</sub> ) por quilograma de emissão.	Kg PO <sub>4</sub> eq
ENR	Energia não renovável incorporada	Avalia o contributo do ciclo de vida de um produto para o esgotamento dos recursos energéticos não renováveis, através da análise do consumo de energia não renovável, fóssil e nuclear. Expressa-se em equivalentes de megajoules (MJ).	MJ eq
ER	Energia renovável incorporada	Permite avaliar a utilização de energia renovável em detrimento de fontes não renováveis associado às fases do ciclo de vida do produto, sendo este um indicador com impacto ambiental positivo. É expressa em equivalentes de megajoules (MJ)	MJ eq

Quadro 3.5 - Categorias de impacto ambiental a adotar, adaptado de (Gouveia, 2015)

A técnica de gestão ambiental tratada nesta dissertação permite a identificação de oportunidades que melhorem os aspetos ambientais dos produtos, no caso deste trabalho, materiais de construção, em diversas fases do seu ciclo de vida. Para que funcione eficazmente, é crucial que mantenha a sua credibilidade técnica, no entanto tendo em conta a flexibilidade e efetividade de custo na sua aplicação.

As componentes ambientais são avaliadas pelas metodologias LCA, através da análise do desempenho das soluções ao nível de certas categorias de impacto ambiental. Todavia, na grande maioria das vezes, não são abordadas as outras dimensões da sustentabilidade, nomeadamente, as componentes sociais e económicas. No entanto, existem metodologias mais complexas que abordam esta componente económica.

É fundamental conhecer as limitações presentes nesta metodologia (Novais, 2017):

- As conjecturas feitas na ACV, como a definição da fronteira do sistema, seleção de fontes de dados e categorias de impacto, podem ser abstratas.
- Os modelos utilizados para análise de inventário ou para avaliação de impactos ambientais podem não estar disponíveis para todos os impactos potenciais e aplicações.
- A exatidão dos estudos pode ser limitada pela disponibilidade de dados pertinentes ou qualidades dos mesmos.

### 3.3.10.FERRAMENTAS PARA ACV

Uma vez que a metodologia ACV é um trabalho bastante complexo, devido à enorme quantidade de dado, no Quadro 3.6 são indicadas algumas ferramentas de apoio a esta metodologia.

Ferramenta	Descrição
SimaPro	Criado pela empresa Pre consultants, esta ferramenta permite analisar e monitorizar o desempenho ambiental dos produtos, processos e serviços, bem como modelizar e analisar ciclos de vida complexos, seguindo os critérios da norma ISO 14040. Esta ferramenta permite analisar todas as fases do ciclo de vida de um dado material, incluindo a extração de matérias-primas, transporte, construção, uso e manutenção, substituições, demolições, reciclagem e eliminação.
Gabi	Desenvolvido pela empresa PE INTERNATIONAL tem como objetivo elaborar avaliações de ciclo de vida de um material, suportando grandes quantidades de informação. Determina avaliações de diferentes tipos e ajuda a agregar os resultados.
Open LCA	A boa visualização dos fluxos da cadeia produtiva e a fácil inserção de dados nos processos elementares são duas das características desta ferramenta. É um software simples para se fazer a exportação de dados, visto que cada processo pode ser exportado individualmente. Outra vantagem é permitir a importação de banco de dados nos formatos mais utilizados.

Quadro 3.6 - Ferramentas/software para ACV, adaptado de (Novais, 2017)

### 3.4.PROGRAMA WUFI

#### 3.4.1.MOTIVOS DA SUA UTILIZAÇÃO

WUFI (Warme und Feuchte instationar – Transient Heat and Moisture) é um modelo unidimensional, bidimensional ou 3D que simula a transferência de calor e humidade desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer em Building Physics (IBP), em Holzkirchen, Alemanha. (De, 2019)

O motivo da utilização deste software, no presente trabalho, prende-se com o objetivo de estudar diferentes tipologias de soluções construtivas para coberturas, no que se refere ao comportamento em relação à humidade (Costa, 2019).

#### 3.4.2.FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

O programa foi validado através de dados in situ e dados laboratoriais, permitindo uma simulação realista do comportamento higrotérmico de elementos construtivos, monolíticos ou multicamadas, expostos a condições climáticas reais. O WUFI é baseado nas mais recentes conclusões relativas à transferência de calor e de massa (que neste caso é a água, líquida ou na fase de vapor) em materiais de construção. Requer apenas as propriedades padrão dos materiais e permite a determinação das funções

de armazenamento de humidade e transporte de líquidos. Este programa pode utilizar dados meteorológicos medidos (incluindo a chuva e a radiação solar) como condições fronteiras, permitindo assim estudos mais realistas sobre o comportamento de elementos construtivos expostos a condições climáticas reais. Esta ferramenta é adequada para a avaliação de (Costa, 2019):

- Tempo de secagem de alvenarias com humidade retida na construção;
- Ocorrência de condensações internas;
- Influência da direção da chuva na componente exterior do elemento construtivo;
- Impacto da reparação ou reabilitação;
- Desempenho higrotérmico de telhados e elementos construtivos em utilizações imprevistas e diferentes condições climáticas;

É uma ferramenta para o desenvolvimento e otimização de materiais e elementos construtivos. Por exemplo, foi utilizado como ferramenta no desenvolvimento de uma barreira para-vapor inteligente. É utilizado por consultores, designers, arquitetos, fabricantes de materiais de construção, seguradoras, escritórios de engenharia e peritos no domínio da higrotérmica. Pode ainda ser usado como ferramenta de ensino tendo em conta a fácil e instrutiva visualização dos resultados de cálculo. O WUFI corre em PCs com NT4 (SP6), Windows 2000, Windows XP e Windows Vista. A opção de Ajuda detalhada contém aproximadamente 200 páginas A4. (Costa, 2019).

O WUFI pode ser utilizado em dez idiomas (Alemão, Inglês, Finlandês, Polaco, Francês, Norueguês, Sueco, Espanhol, Italiano e Português).

A aplicação correta do WUFI requer experiência no campo da higrotérmica e alguns conhecimentos básicos de utilização de métodos numéricos.

### 3.4.3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

#### 3.4.3.1. ECRÃ PRINCIPAL

Quando se abre o programa, este é o que se visualiza, estando a janela principal dividida em vários espaços por forma a organizar melhor a informação dando, deste modo, uma maior facilidade de interação ao utilizador, como se vê na Fig. 3.16:

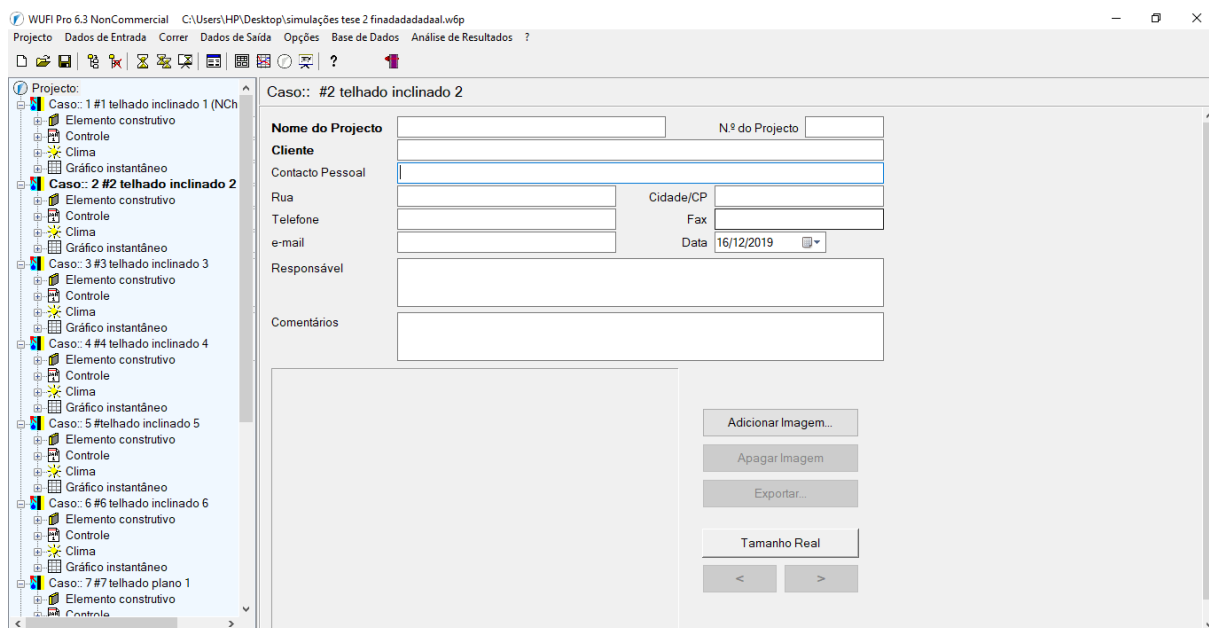


Fig. 3.16 - Ecrã principal WUFI

- 1) Barra de Legenda: indica o nome do programa e o nome do projeto no qual se vai trabalhar;
- 2) Barra de Menus: contém os diversos menus principais;
- 3) Barra de Ferramentas: ícones que dão acesso ao utilizador aos comandos mais utilizados permitindo, assim, um alcance de forma imediata;
- 4) Explorar: é uma alternativa ao menu “Dados de Entrada” e oferece um fácil e rápido acesso às diferentes caixas de texto;
- 5) Informação de projeto: neste espaço são guardadas as informações do projeto e comentários;

### 3.4.3.2. BARRA DE MENUS

Existem sete opções disponíveis no menu principal como demonstra a Fig. 3.17:

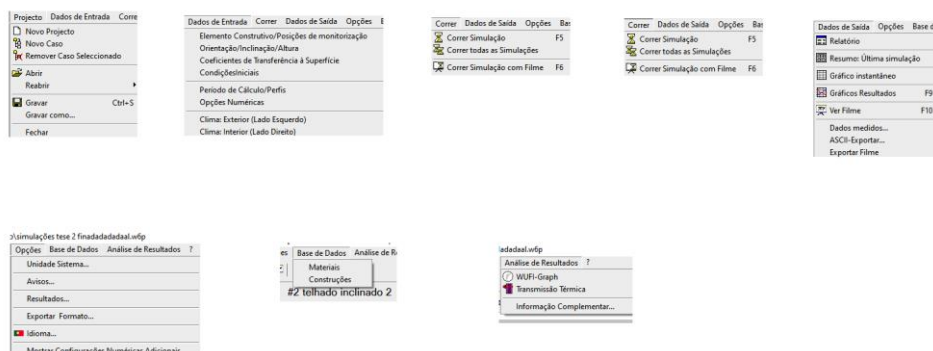


Fig. 3.17 - Menu principal WUFI

- 1) Projeto: Inicia um novo projeto ou abre um projeto já existente e permite guardar o trabalho executado;
- 2) Dados de entrada: permite criar e/ou alterar a geometria dos elementos construtivos, introduz os materiais intervenientes e as condições fronteira e introduz outros elementos;
- 3) Correr: executa a simulação pretendida;
- 4) Dados de saída: visualiza os resultados da simulação efetuada;
- 5) Opções: opções alternativas do programa;
- 6) Base de dados: arquivo de matérias de construções e soluções construtivas de vários elementos;
- 7) Análise de resultados

#### 3.4.3.3.DADOS DE ENTRADA

Para se realizar uma simulação do comportamento higrotérmico dos elementos de construção é necessária a informação seguinte (Costa, 2019):

- Informação relativamente ao elemento construtivo
  - Elemento construtivo/Posições de monitorização – Abre o diálogo onde a montagem de construção, parâmetros de materiais e posições de monitorização podem ser definidas, tal como se demonstra na seguinte Fig. 3.18:
  - Orientação/Inclinação /Altura – Abre o diálogo onde a orientação, inclinação e altura acima do solo do elemento de construção podem ser definidos, como demonstra a Fig. 3.19.
  - Coeficiente de transferência à superfície – Abre a caixa de diálogo onde as propriedades de transferência de superfície para a superfície exterior e interior podem ser definidas, como se observa na Fig. 3.20.
  - Condições Iniciais – Abre o diálogo onde as distribuições iniciais de Humidade relativa e condições de temperatura podem ser definidas, como representado na Fig. 3.21.



Caso:: #14

Elemento Construtivo/Posições de monitorização | Orientação/Inclinação/Altura | Coeficiente de Transferênc

Nome da Camada: Camada1 | Espessura [m]:

Exterior (Lado Esquerdo) | Interior (Lado Direito)

Dados do Material

Fontes, Perdas

Nova Camada

Duplicar

Apagar

Editar Elem. Construtivo:  
☒ Gráfico  
☐ Tabela

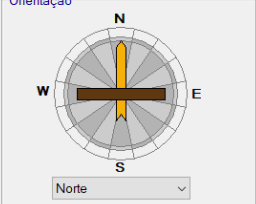
Atribuir a partir de: Base de Dados de Materiais | Exemplo de Casos

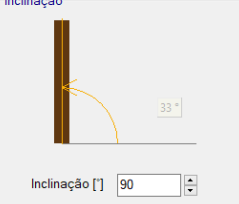
Malha: Automático (II) | 100 | Fina

Fig. 3.18 - Elemento construtivo/Posições de monitorização

Caso:: #14

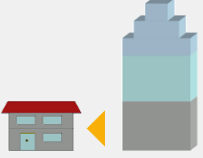
Elemento Construtivo/Posições de monitorização | Orientação/Inclinação/Altura | Coeficiente de Transferênc

Orientação:  Norte

Inclinação:  Inclinação [°] 90

Altura do Edifício/Coefficientes de Chuva Incidente

☐ Chuva incidente calculada segundo a Norma ASHRAE 160

 Edifício pequeno, altura até 10 m

R1 [-]: 0

R2 [s/m]: 0.07

Nota:  
 Intensidade da Chuva =  
 Precipitação \* (R1 + R2 \* Velocidade)

Fig. 3.19 - Orientação/Inclinação/Altura

- Controle
  - Período de simulação/Perfis - Permite seleccionar a hora de início e a duração do período de simulação, conforme se observa na Fig. 3.21;
  - Numérico – Definição dos modos de cálculo como transferência de calor ou cálculo da transferência de humidade, existindo outras opções higrotérmicas especiais, como indicado na Fig. 3.21;

Caso:: #14

Orientação/Inclinação/Altura | **Coefficiente de Transferência à Superfície** | Condições Iniciais

---

**Superfície Exterior (Lado Esquerdo)**

Resistência Térmica [(m² K)/W]  Parede exterior

Inclui Parte da Radiação de Onda Longa [W/(m² K)]

dependente do vento ☐

---

Valor de sd [m]  Sem revestimento

Nota: Esta definição não afecta a absorção de chuva

---

Absorção (Radiação de Onda Curta) [-]  Sem absorção/emissão

Emissividade (Radiação Onda Longa) [-]

Factores de redução provocados pelo sombreamento:

para a absorção solar [-]  sem sombreamento

para a emissividade [-]

Balanco Radiativo Explicito ☐ Nota: Esta opção considera o amolecimento radiativo devido à emissão de onda longa. Casos específicos podem precisar de dados de radiação de onda longa mais precisos, no ficheiro climático.

---

Reflectividade do solo (Onda Curta) [-]  Valor padrão

---

Factor de redução da chuva incidente [-]  Dependente da inclinação do elemento construt

Fig. 3.20 - Coeficiente de transferência à superfície

Caso:: #14

Humidade inicial no elemento construtivo

☒ Constante através do elemento construtivo

☐ Em cada Camada

☐ Ler do Ficheiro

Temperatura inicial

☒ Constante através do elemento construtivo

☐ Ler do Ficheiro

Humidade Relativa inicial [-]  Temperatura inicial [°C]

**Teor de Humidade Inicial nas diferentes Camadas**

N.º	Material Camada	Espessura [m]	Humidade Teor [kg/m³]
1	Camada1		

Fig. 3.21 - Condições Iniciais

- **Clima**
  - Exterior (lado esquerdo) – Nesta caixa de diálogo é definido os dados climáticos do lado esquerdo do elemento construtivo em estudo. Ambientes interiores e exteriores podem ser atribuídos ao lado esquerdo, como se observa na Fig. 3.22.
  - Interior (Lado Direito) – Nesta caixa de diálogo é definido os dados climáticos do interior, neste caso, lado direito do WUFI, como demonstra a Fig. 3.23.

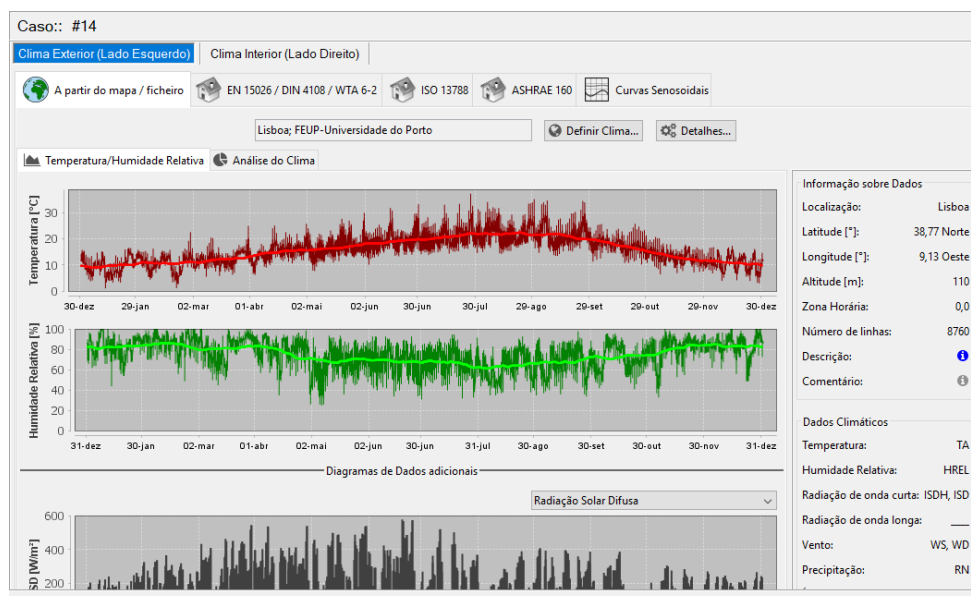


Fig. 3.22 - Exterior, lado esquerdo do elemento construtivo



Fig. 3.23 - Interior, lado direito do elemento construtivo

#### 3.4.3.4. TABELA DE PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os materiais disponíveis na base de dados do programa WUFI são caracterizados através das propriedades indicadas no Quadro 3.7.

Propriedades	Unidades
Massa volúmica - $\rho$	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico - $c_p$	J/(Kg.K)
Porosidade - $\varepsilon$	%, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Condutibilidade térmica - $\lambda$	W/(m.K)
Fator de resistência à difusão de calor - $\mu$	-
Curvas higroscópicas	
Coeficiente de transporte líquido - $D_w$	M <sup>2</sup> /s
Coeficiente de absorção - $A_w$	Kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>0.5</sup> )
Teor de humidade de saturação - $W_{sat}$	Kg/m <sup>3</sup>

Quadro 3.7 - Propriedades dos materiais do programa WUFI

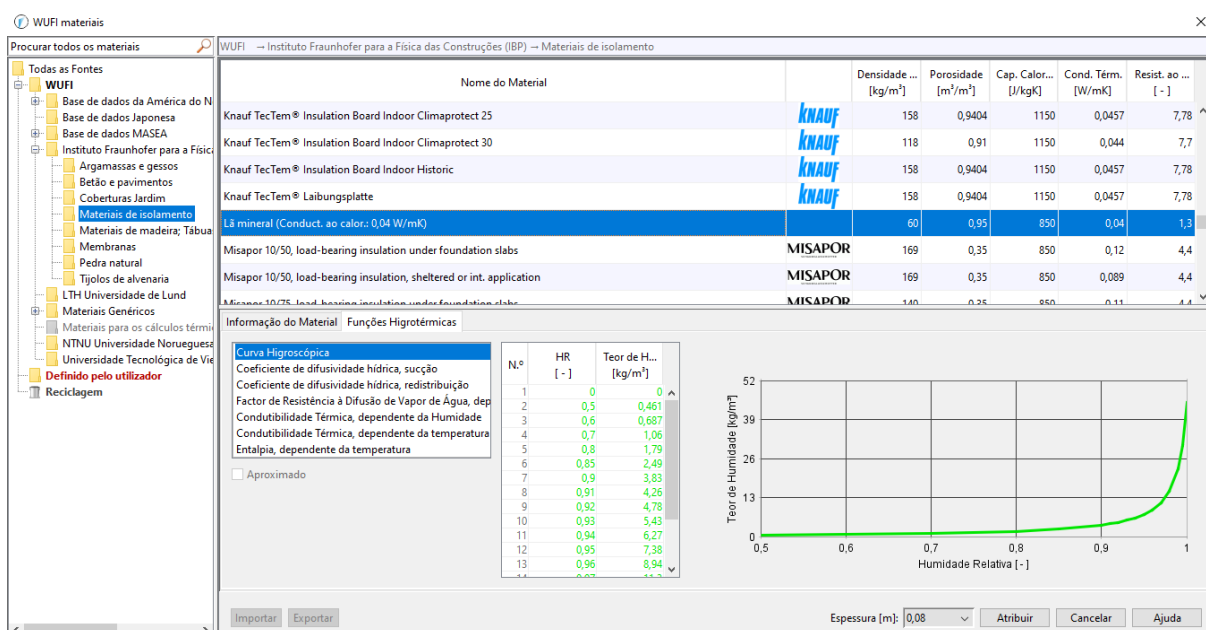


Fig. 3.24 - Exemplo de um material que se encontra na base de dados do programa WUFI

#### 3.4.3.5. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Para cada simulação, é necessário conhecer os valores dos dados climáticos enunciados no Quadro 3.8.

Dados Climáticos	Unidades
Chuva incidente na superfície vertical exterior	l/m <sup>2</sup> .h
Radiação solar incidente na superfície vertical	W/m <sup>2</sup>

Temperatura do ar exterior	°C
Humidade relativa do ar exterior	0-1
Temperatura do ar interior	°C
Humidade relativa do ar interior	0-1
Pressão atmosférica	Pa

Quadro 3.8 - Condições climáticas do programa WUFI

#### 3.4.3.6. COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA SUPERFICIAL

Para a execução das simulações são necessários os seguintes coeficientes de transferência superficiais:

- Resistências térmicas superficiais interior e exterior;
- Fator de absorção da chuva, considerando que parte da chuva incidente numa superfície não contribui para a sucção capilar.
- Coeficiente de absorção da radiação solar que traduz a fração da radiação total incidente que é absorvida pela superfície do elemento;

#### 3.4.3.7. DADOS DE SAÍDA

O programa WUFI disponibiliza gráficos que auxiliam a interpretar os resultados de cada simulação, que estão representados na seguinte Fig. 3.25:

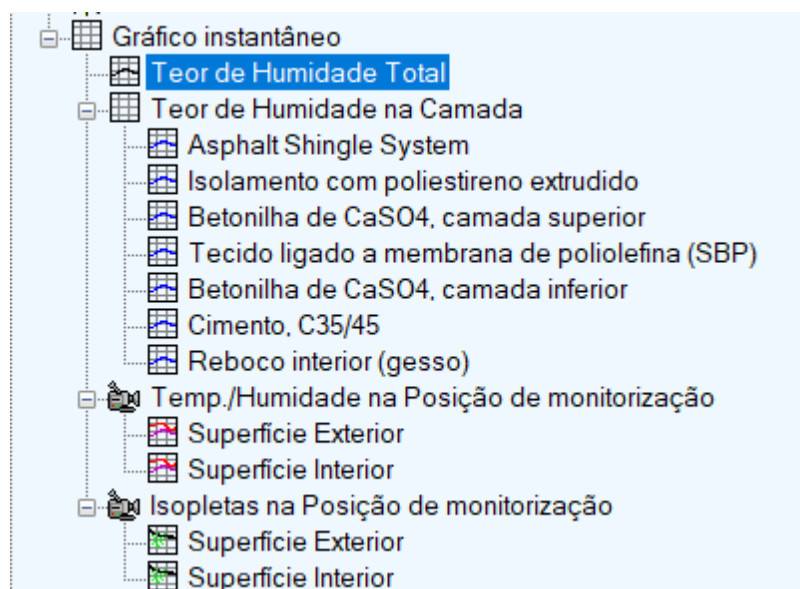


Fig. 3.25 - Tipos de gráficos que se pode obter no programa WUFI após a realização da simulação

# 4

## DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Uma vez conhecidas as funcionalidades do programa WUFI, este capítulo tem como objetivo apresentar as simulações de seis tipos de soluções construtivas de coberturas avaliando o comportamento relativamente ao teor de humidade, sendo que três são planas e as restantes inclinadas.

O objetivo é analisar as diferenças do comportamento face à humidade de vários tipos de soluções construtivas. Nestas foram utilizados materiais diferentes, bem como tipologias construtivas diferentes.

### 4.2. ELEMENTOS NECESSÁRIOS À EXECUÇÃO DE UMA SIMULAÇÃO

É importante, antes de mais, referir que durante a definição de cada solução construtiva das coberturas, houve uma grande dificuldade, no programa WUFI, em encontrar os materiais que sejam utilizados nas construções atuais em Portugal. Para isso, o utilizador fez uma pesquisa sobre algumas propriedades dos materiais mais comuns em coberturas, e utilizou materiais com características idênticas presentes no programa utilizado. No programa WUFI a introdução de um novo material que não exista na sua base de dados é possível, sendo para isso necessário introduzir-se algumas propriedades que serão descritas mais à frente neste capítulo. Deste modo, as propriedades dos materiais utilizados em falta foram alteradas, tendo por base catálogos, e regulamentos técnicos, de modo a simular o melhor possível a realidade (Morishita *et al.*, [s.d.]).

#### 4.2.1. PROPRIEDADES IMPORTANTES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Como referido anteriormente, houve alguma dificuldade em encontrar materiais utilizados em coberturas, na base de dados do programa WUFI. Assim, foi imperativo alterar algumas propriedades importantes de materiais parecidos, sendo estas:

- Massa Volúmica ();
- Calor específico ();
- Porosidade ();
- Condutibilidade térmica ();
- Fator de resistência à difusão do vapor ();
- Curva Higroscópica (relação entre a humidade relativa e o teor de humidade);

Assim, com a alteração das propriedades referidas, foi possível chegar a materiais idênticos aos utilizados na construção de coberturas atualmente. Para além das propriedades referidas serem importantes na realização deste trabalho, a espessura de cada material também é fundamental. No entanto, este tema será abordado mais aprofundadamente mais à frente

#### 4.2.2. LOCALIZAÇÃO E ORIENTAÇÃO

Para a realização de cada simulação no programa WUFI, é necessário definir previamente a localização do edifício que será analisado, bem como a orientação e inclinação do elemento em estudo, neste caso a cobertura.

Relativamente à localização, foi escolhido pelo utilizador a zona de Lisboa. Apesar de algumas diferenças relativamente ao clima de Lisboa e do Porto, foi adotada esta solução uma vez que era a única localização em Portugal continental presente no programa.

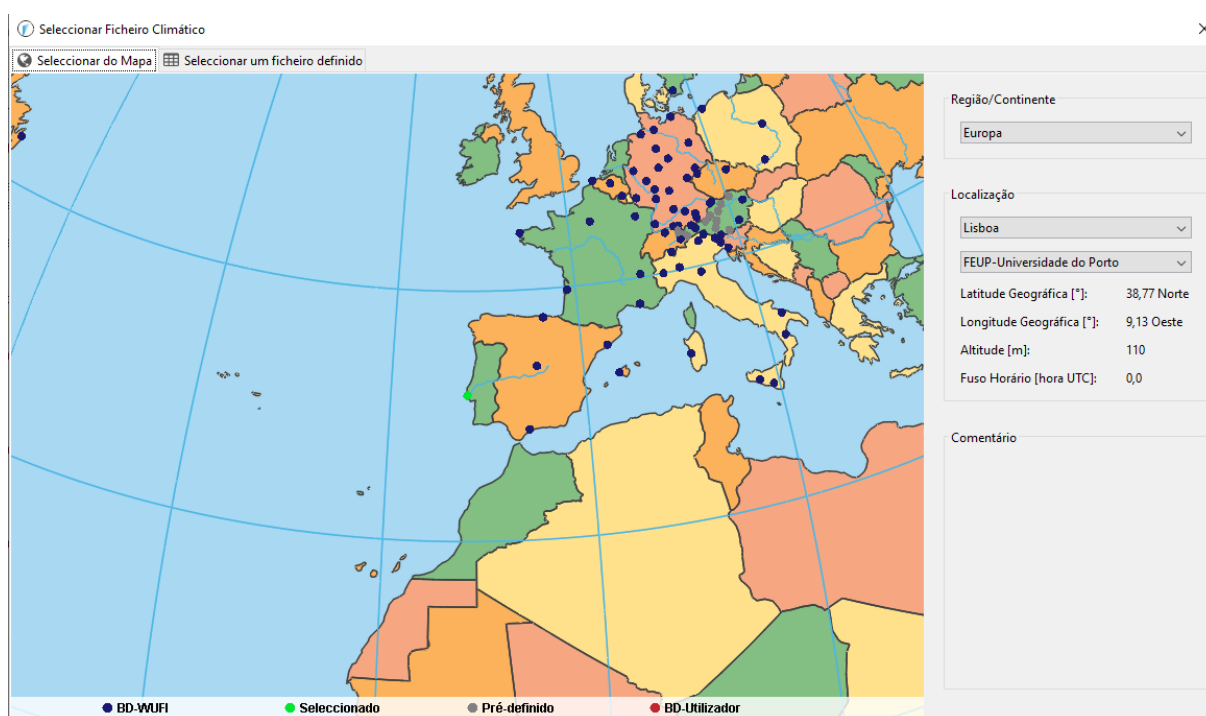


Fig. 4.1 - Mapa com a localização selecionada

No que diz respeito à orientação do elemento em estudo, apesar de se tratar de uma cobertura, e, teoricamente não ter propriamente uma orientação definida visto estar no topo do edifício, há que ter em conta que iremos estudar coberturas inclinadas. Deste modo foi selecionada a orientação a norte visto ser, à partida, a orientação mais desfavorável. No que toca a cobertura plana, é indiferente a orientação adotada, dado se tratar do plano horizontal e, para qualquer orientação, os acontecimentos climáticos e as radiações solares na superfície em estudo são exatamente iguais. Quanto a inclinação do elemento, uma vez que se vai estudar dois tipos de coberturas, inclinadas e planas, foram utilizadas duas inclinações distintas, 30° e 0°, respetivamente.

#### 4.2.3.CONDIÇÕES EXTERIORES

As condições exteriores utilizadas em cada simulação são definidas consoante a localização adotada. Como referido anteriormente, escolheu-se a cidade de Lisboa para a realização deste trabalho. Assim, na Fig. 4.2, podemos observar a temperatura, a humidade relativa e a precipitação, num ano referencia, em Lisboa.

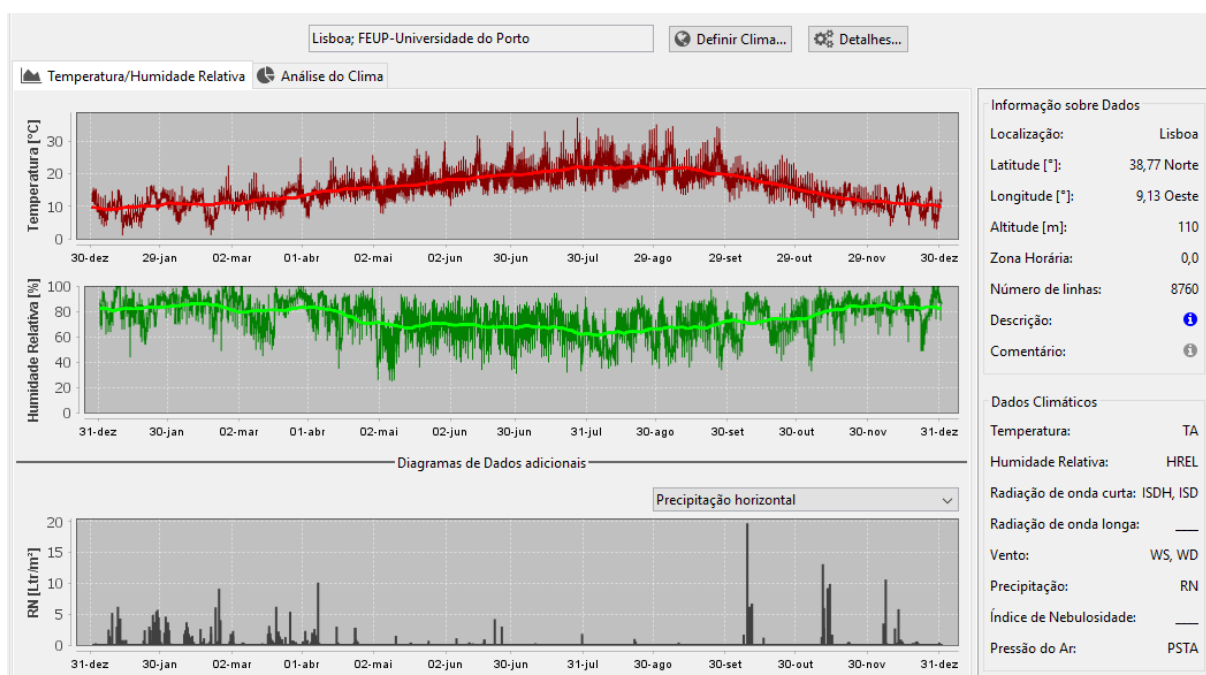


Fig. 4.2 - Temperatura, humidade relativa e precipitação em Lisboa

Na Fig. 4.3 temos indicado os valores médio, máximo e mínimo, da temperatura na capital portuguesa, bem como os valores máximo, mínimo e médio da humidade relativa. Podemos observar, também o valor da velocidade do vento médio e o somatório da precipitação normal. Por fim, estão representados dois gráficos, que se referem ao somatório da radiação solar e somatório da chuva incidente em Lisboa.



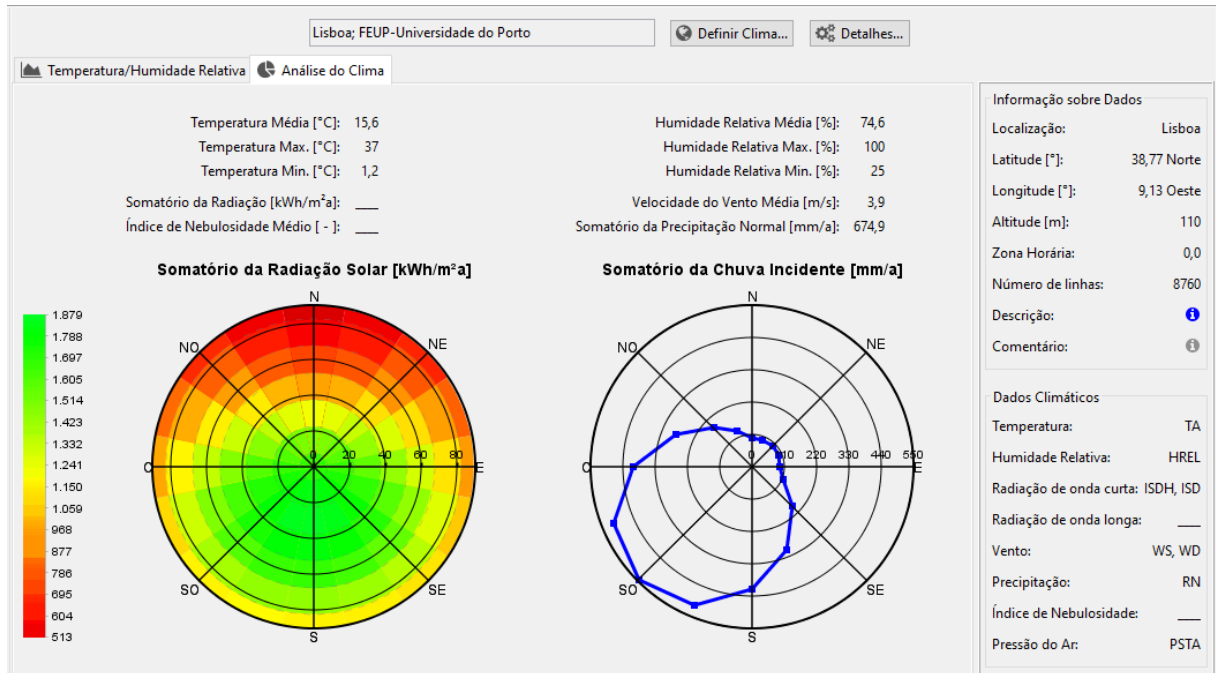


Fig. 4.3 - temperatura e humidade, valores máximos e mínimos, e chuva incidente

#### 4.2.4.CONDIÇÕES INTERIORES

Para a realização deste trabalho é imprescindível utilizar valores de temperatura ambiente interior e humidade relativa interior adequados e que reflitam o que acontece na realidade. Assim, conforme indicado na Fig. 4.4, foi utilizada como referência uma temperatura média interior de 20°, com uma amplitude de 2°. Foi considerado que no dia 22 de junho de cada ano (em cada simulação foram utilizados 3 anos, como será explicado mais à frente) a temperatura interior foi a máxima registada.

No que diz respeito à humidade relativa o valor médio considerado foi 55%, com uma amplitude de 15%. O máximo valor registado aconteceu no dia 16 de agosto.

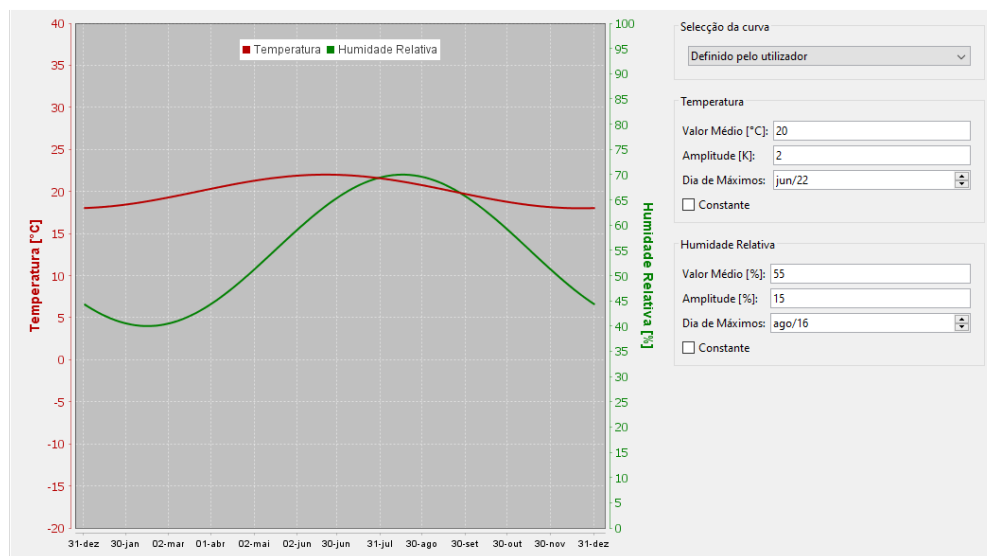


Fig. 4.4 - Temperaturas e humidade interior

#### 4.2.5. PERÍODO DE SIMULAÇÃO

O período de simulação considerado neste trabalho foi de três anos. Cada simulação teve início às 00 horas do dia 1 de outubro de 2019, tendo terminado no dia 1 de outubro de 2022, às 24 horas.

#### 4.3. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ANALISADAS

Como já foi abordado no capítulo 2, existem diversos tipos de coberturas utilizadas em Portugal, podendo estas ser coberturas inclinadas ou coberturas planas. Deste modo, este trabalho estudará estas duas soluções construtivas de coberturas.

O Quadro 4.1 apresenta uma abreviatura para cada estrutura analisada, de modo a facilitar a leitura do leitor, permitindo uma mais fácil identificação da tipologia construtiva de utilizada em cada cobertura.

Cobertura	Telhado em PVC
Cobertura inclinada 1	1_CI_PVC/XPS
Cobertura inclinada 1 com pára-vapor	1_CI_PVC_XPS_PV
Cobertura inclinada 2	2_CI_FB_XPS_PV
Cobertura inclinada 3	3_CI_FB_LA
Cobertura inclinada 3 com barreira pára-vapor	3_CI_FB_LA_PV
Cobertura inclinada 4	4_CI_CE_LA
Cobertura inclinada 4 com barreira pára-vapor	4_CI_CE_LA_PV
Cobertura inclinada 5	5_CI_MZ_PU_PV<
Cobertura inclinada 6	6_CI_MZ_PU_PV>
Cobertura plana 1	1_CPT_PVC_XPS_PV-POLI

Cobertura plana 2	2_CPT_ASF_XPS_PV-XPS
Cobertura plana 3	3_CPI_XPS_PV-PVC
Cobertura plana 4	4_CPI_XPS_PV-ASF

Quadro 4.1 - Lista de coberturas e respetiva abreviatura

#### 4.3.1. COBERTURAS INCLINADAS

##### 4.3.1.1. PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DUMA COBERTURA INCLINADA

Para iniciar este estudo, a primeira cobertura é constituída por uma superfície exterior em PVC com 0,005 m de espessura, seguida de uma camada de ar não ventilada com 0,030 m de espessura. O isolamento térmico desta cobertura é garantido pela colocação de uma placa de poliestireno extrudido (XPS) com uma espessura de 0,06 m. As camadas anteriores estão apoiadas numa laje de betão armado, em que o cimento constituinte é o C35/45 com 0,2 m de espessura. O revestimento interior é feito à base de gesso cartonado com 0,01m de largura. A Fig. 4.5 é um esquema desta cobertura.

De modo a obter melhores resultados no que respeita à ocorrência de condensações, que serão discutidos no capítulo seguinte, optou-se por adicionar uma barreira pára-vapor entre o isolamento térmico, neste caso a placa de poliestireno extrudido e a laje em betão armado. Assim, será possível verificar as diferenças relativamente às condensações neste elemento construtivo.

As propriedades desta barreira pára-vapor podem ser consultadas no Quadro 4.2.

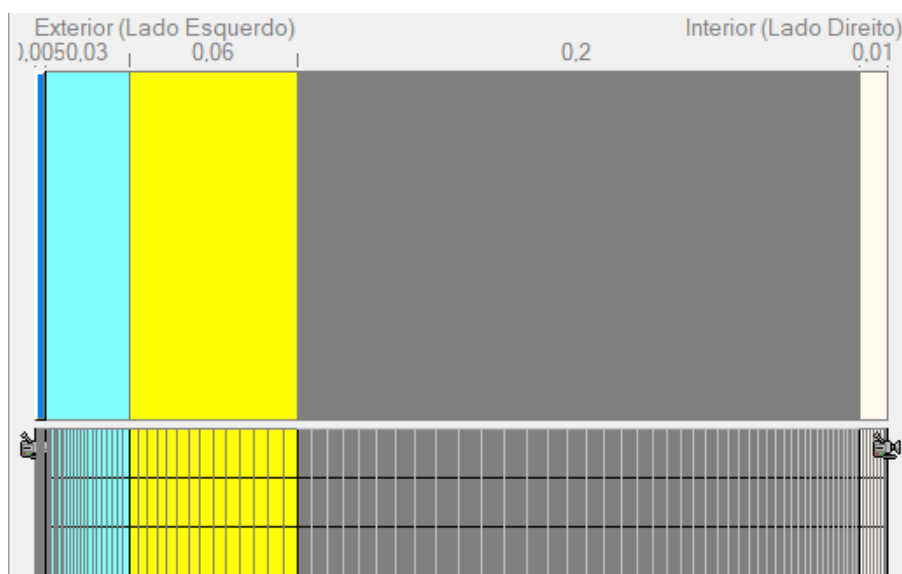


Fig. 4.5 - Esquema da cobertura inclinada 1 sem a barreira pára-vapor

Na Quadro 4.2 pode-se observar os valores das propriedades mais importantes dos materiais que compõem esta cobertura.

Material/Camada	Telhado em PVC	Camada de ar 30 mm	XPS Placa de poliestireno extrudido	Barreira pára-vapor em polietileno	Betão armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1300	1,3	40	130	2220	2000
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,0002	0,999	0,95	0,001	0,18	0,3
Calor Específico (J/KgK)	1040	1000	1500	2300	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,2	0,18	0,03	2,3	1,6	1,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	15000	0,46	100	20000	248	25
Espessura da camada (m)	0,005	0,03	0,06	0,001	0,2	0,001

Quadro 4.2 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 1 para coberturas inclinadas

#### 4.3.1.2.SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DUMA COBERTURA INCLINADA

Para a realização da segunda simulação, utilizou-se uma cobertura muito idêntica à anterior, apenas com a alteração da superfície exterior, que agora é composta por um painel de fibrocimento (sem amianto) com uma espessura de 0,013m, conforme ilustra a Fig. 4.6.

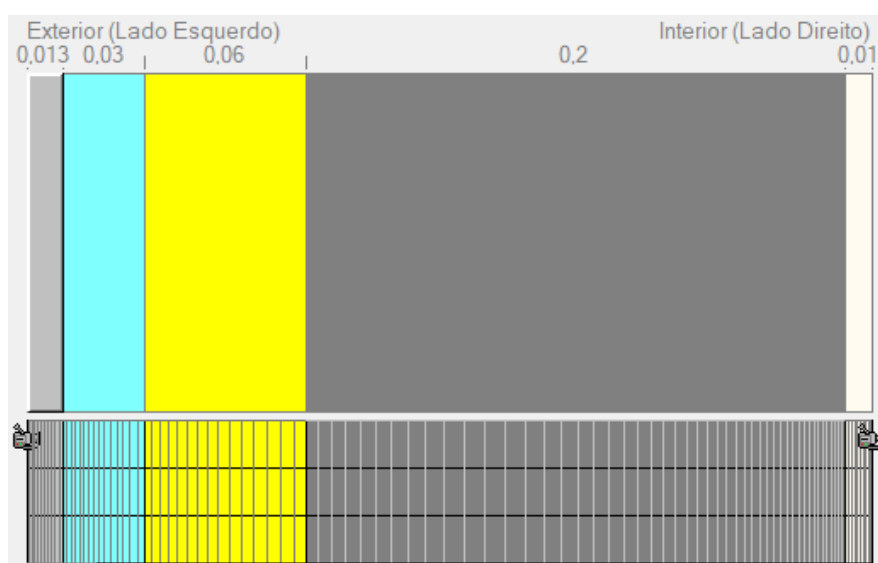


Fig. 4.6 - Esquema construtivo da cobertura inclinada 2 sem barreira pára-vapor

O Quadro 4.3 contém as propriedades mais relevantes dos materiais utilizados nesta tipologia construtiva.

Material/Camada	Painel de fibrocimento	Camada de ar 30 mm	XPS Placa de poliestireno extrudido	Betão Armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1900	1,3	40	2220	2000
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,16	0,999	0,95	0,18	0,3
Calor Específico (J/KgK)	850	1000	1500	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,95	0,18	0,03	1,6	1,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	83,3	0,46	100	248	25
Espessura da camada (m)	0,013	0,03	0,06	0,2	0,001

Quadro 4.3 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 2 para coberturas inclinadas

#### 4.3.1.3. TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA INCLINADA

Como terceira solução construtiva, utilizou-se na parte exterior um painel de fibrocimento com 0,013m de espessura, uma caixa de ar com 0,03m não ventilada. Como isolamento térmico optou-se pela colocação de lã mineral (com uma condutibilidade térmica de 0,04 W/mK), com 0,08m de espessura. A estrutura desta cobertura é assegurada por cimento C35/45 com 0,20m. Por fim, o revestimento interior é feito à base de gesso com 0,015m.

De modo a obter melhores resultados no que respeita à ocorrência de condensações, que serão discutidos no capítulo seguinte, optou-se por adicionar uma barreira para-vapor entre o isolamento térmico, neste caso a placa de poliestireno extrudido e a laje em betão armado. Assim, será possível verificar as diferenças relativamente às condensações neste elemento construtivo.

As propriedades desta barreira para-vapor podem ser consultadas no Quadro 4.4.

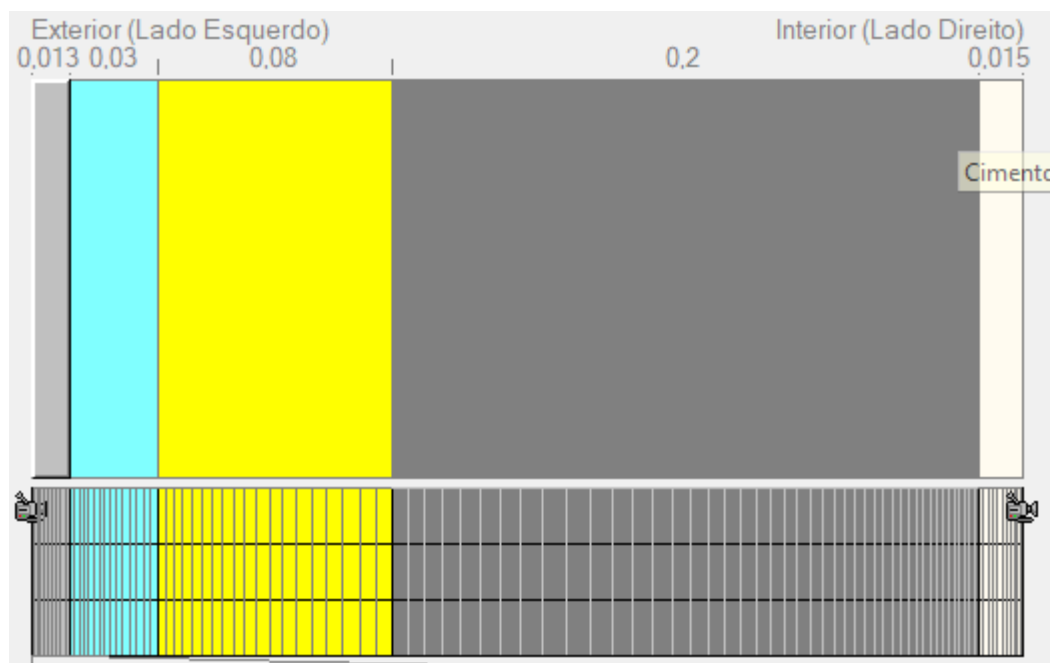


Fig. 4.7 - Esquema da cobertura inclinada 3 sem a barreira pára-vapor

O Quadro 4.4 apresentada de seguida, contém as propriedades mais relevantes dos materiais utilizados na 3ª cobertura inclinada.

Material/Camada	Painel de fibrocimento	Camada de ar 30 mm	Lã Mineral	Barreira para vapor em polietileno	Betão Armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1900	1,3	60	130	2220	2000
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,16	0,999	0,95	0,001	0,18	0,3
Calor Específico (J/KgK)	850	1000	850	2300	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,95	0,18	0,04	2,3	1,6	1,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	83,3	0,46	1,3	20000	248	25

Espessura da camada (m)	0,013	0,03	0,08	0,001	0,2	0,001
-------------------------	-------	------	------	-------	-----	-------

Quadro 4.4 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 3 para coberturas inclinadas

## 4.3.1.4. QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA INCLINADA

A quarta simulação será realizada para uma cobertura idêntica à anterior, com a exceção do revestimento exterior que será feito recorrendo a telhas de barro (cerâmicas), tendo estas, uma espessura de 0,013m.

De modo a obter melhores resultados no que respeita à ocorrência de condensações, que serão discutidos no capítulo seguinte, optou-se por adicionar uma barreira para-vapor entre o isolamento térmico, neste caso a placa de poliestireno extrudido e a laje em betão armado. Assim, será possível verificar as diferenças relativamente às condensações neste elemento construtivo.

As propriedades desta barreira pára- vapor podem ser consultadas no Quadro 4.5

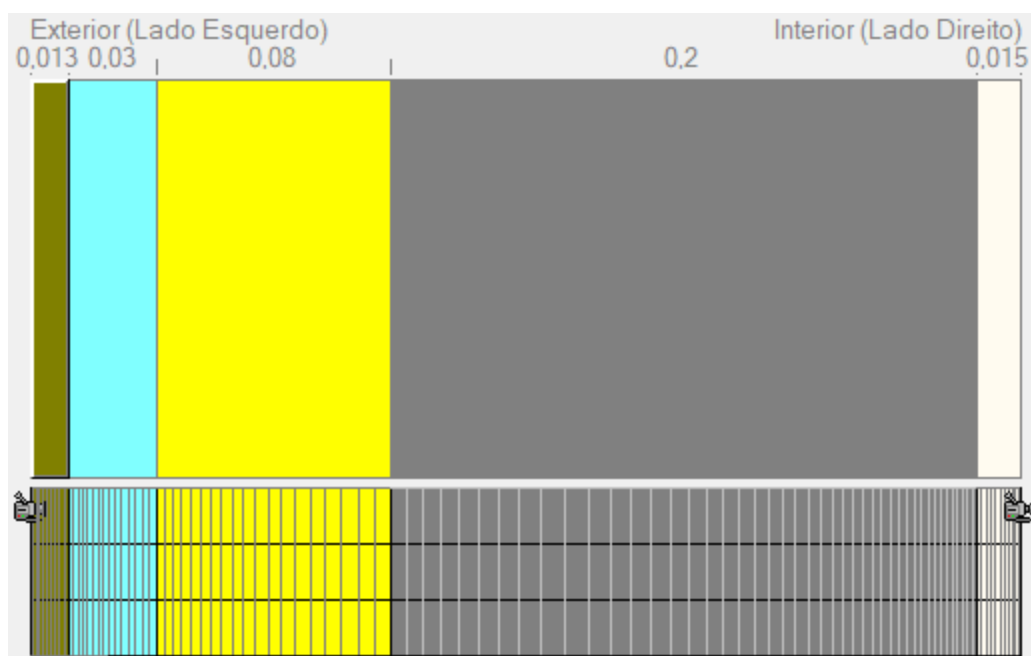


Fig. 4.8 - Esquema da cobertura inclinada 4 sem a barreira pára-vapor

De seguida, é apresentado o Quadro 4.5 com as propriedades características dos materiais que compõem esta cobertura.

Material/Camada	Telha de barro (cerâmico)	Camada de ar 30 mm	Lã Mineral	Barreira para vapor em polietileno	Betão armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1300	1,3	60	130	2220	2000

Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,517	0,999	0,95	0,001	0,18	0,3
Calor Específico (J/KgK)	920	1000	850	2300	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,288	0,18	0,04	2,3	1,6	1,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	50	0,46	1,3	20000	248	25
Espessura da camada (m)	0,013	0,03	0,08	0,001	0,2	0,001

Quadro 4.5 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 4 para coberturas inclinadas

## 4.3.1.5. QUINTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA INCLINADA

Neste caso, começamos por aplicar uma telha metálica como revestimento exterior, seguida de uma caixa de ar com 0,030m. Uma camada de Espuma pulverizada de poliuretano (com célula fechada) com 0,089m de espessura irá garantir o isolamento térmico do edifício. Como nos casos anteriores, teremos uma solução estrutural em betão armado, com cimento C35/45 com 0,20m de espessura, e no interior da cobertura será utilizado um reboco em gesso.

De modo a obter melhores resultados no que respeita à ocorrência de condensações, que serão discutidos no capítulo seguinte, optou-se por adicionar uma barreira para-vapor entre o isolamento térmico, neste caso a placa de poliestireno extrudido e a laje em betão armado. Assim, será possível verificar as diferenças relativamente às condensações neste elemento construtivo.

As propriedades desta barreira pára- vapor podem ser consultadas no Quadro 4.6

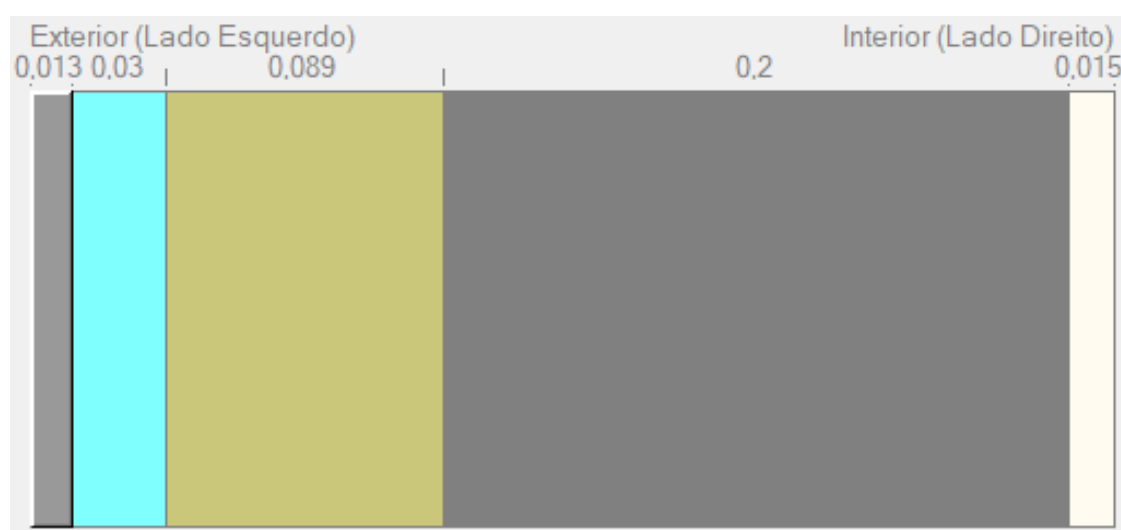


Fig. 4.9 - Esquema da cobertura inclinada 5



As propriedades dos materiais utilizados na quinta solução construtiva estão descritas no Quadro 4.6

Material/Camada	Telha metálica	Camada de ar 30 mm	Espuma pulverizada de poliuretano (célula fechada)	Barreira para vapor em polietileno	Betão Armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	7800	1,3	39	130	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,001	0,999	0,99	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	450	1000	1470	2300	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	46	0,18	0,025	2,3	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	6400	0,46	88,93	20000	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,013	0,03	0,089	0,001	0,2	0,015

Quadro 4.6 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 5 para coberturas inclinadas

#### 4.3.1.6. SEXTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA INCLINADA

Para a realização da sexta simulação, optou-se por utilizar a solução construtiva do quinto ponto, no entanto substituir a barreira para-vapor, por uma membrana asfáltica entre a laje em betão armado e o isolamento térmico.

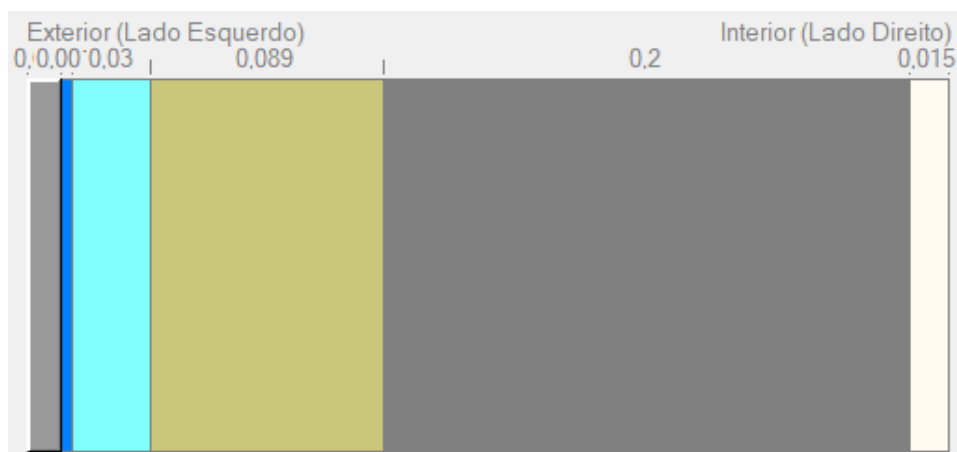


Fig. 4.10 - Esquema construtivo da cobertura inclinada 6

De seguida é apresentado o Quadro 4.7 com a propriedades dos materiais da cobertura inclinada 6:

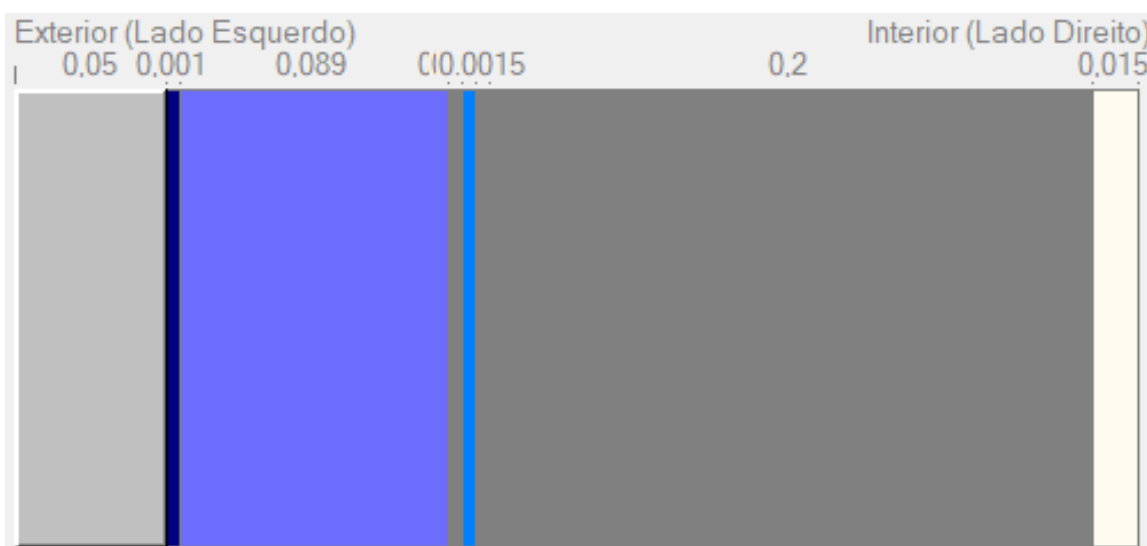
Material/Camada	Telha Metálica	Camada de ar 30 mm	Espuma pulverizada de poliuretano	<i>Asphalt shingle system</i>	Betão armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	7800	1,3	39	1500	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,001	0,999	0,99	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	450	1000	1470	1500	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	46	0,18	0,025	0,2	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	6400	0,46	88,93	2730	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,013	0,03	0,089	0,004	0,2	0,0015

Quadro 4.7 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 6 para coberturas inclinadas

#### 4.3.2. COBERTURAS PLANAS

##### 4.3.2.1. PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA PLANA

Para iniciar o estudo relativo às coberturas planas, será utilizada uma solução construtiva convencionalmente designada como cobertura tradicional, onde a impermeabilização fica numa posição superior face ao isolamento térmico. Neste caso, o exterior é revestido por uma camada de godo com 0,05m de espessura, seguida por um material impermeabilizante que é a membrana em PVC. O isolamento térmico da cobertura é da responsabilidade de uma camada de poliestireno extrudido (XPS) com 0,089 m de largura, a que se segue uma fina camada de regularização composta por betonilha de CaSO<sub>4</sub> com 0,001m de espessura. A seguir temos um retardador de vapor constituído a base de polietileno com 0,001m de espessura que funciona como barreira para-vapor com 1,5mm de largura. A estrutura da cobertura é realizada por um elemento em betão armado idêntico ao utilizado nas coberturas inclinada, sendo que o revestimento interior é feito à base de gesso cartonado.



Quadro 4.8 - Esquema construtivo da cobertura plana 1

De seguida é apresentado o Quadro 4.9 com as propriedades dos materiais da cobertura plana 1:

Material/Camada	Gravel (gravilha)	Membrana em PVC	Poliestireno extrudido XPS	Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	Retardador de vapor à base de polietileno	Betão armado	Gesso Cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1400	1500	40	1960	130	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,3	0,001	0,95	0,23	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	1000	1500	1500	850	2300	850	850

Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,7	0,2	0,03	1,6	2,3	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	1	10761	100	18	20000	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,05	0,00152	0,06	0,005	0,001	0,2	0,015

Quadro 4.9 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 1 para coberturas planas

## 4.3.2.2. SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA PLANA

Neste caso, na parte exterior temos a gravilha que “pavimenta” a parte superior da cobertura, sendo que por baixo desta existe uma fina camada de manta asfáltica, denominada por “*Asphalt Shingle System*”, com 0,004 m de espessura que garante toda a impermeabilização do elemento construtivo. Por baixo desta, encontra-se o isolamento térmico que é garantido por placas de poliestireno extrudido. Depois, para assegurar a regularização de toda a superfície existe uma fina camada de betonilha de CaSO<sub>4</sub> com 0,001m de espessura que divide o isolamento térmico da membrana em PVC com 0,00152 m de largura, que funciona como barreira pára-vapor. Por fim, com 0,2 m de largura temos a parte estrutural, da cobertura, que é feita à base de betão armado, e o reboco interior em gesso cartonado.



Fig. 4.11 - Esquema construtivo da cobertura plana 2

De seguida é apresentado o Quadro 4.10, com a propriedades dos materiais da cobertura plana 2:

Material/Camada	Generic Gravel (gravilha)	Membrana asfáltica (Asphalt Shingle System)	Poliestireno extrudido (XPS)	Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	Membrana de PVC	Betão armado	Gesso cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1400	1500	40	1960	1500	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,3	0001	0,95	0,23	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	1000	1500	1500	850	1500	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,7	0,2	0,03	1,6	0,2	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	1	2730	100	18	10761	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,05	0,004	0,06	0,005	0,00152	0,2	0,015

Quadro 4.10 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 2 para coberturas planas

#### 4.3.2.3. TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA PLANA

A terceira simulação, terá por base uma cobertura invertida, isto é, onde o isolamento térmico fica depois da impermeabilização (de dentro para fora). Desta forma, o revestimento exterior fica a cargo de uma camada de godo, seguindo-se uma camada de regularização em betonilha CaSO<sub>4</sub>, que separa o revestimento exterior do isolamento térmico em poliestireno extrudido (XPS). Estes elementos estão apoiados numa laje de betão armado e o interior é revestido em gesso cartonado.

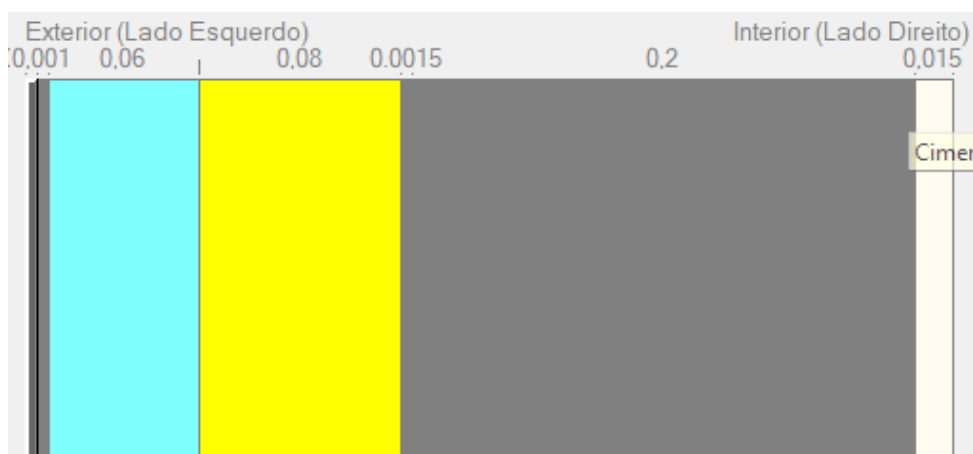


Fig. 4.12 - Esquema construtivo da cobertura plana 3

De seguida é apresentado o Quadro 4.11 com as propriedades dos materiais da cobertura plana 3:

Material/Camada	Generic Gravel (gravilha)	Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	Poliestireno extrudido (XPS)	Membrana de PVC	Betão Armado	Gesso cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1400	1960	40	1500	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,3	0,23	0,95	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	1000	850	1500	1500	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,7	1,6	0,03	0,2	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	1	18	100	10761	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,05	0,005	0,06	0,00152	0,2	0,015

Quadro 4.11 - Propriedades dos materiais da solução construtiva 3 para coberturas planas

#### 4.3.2.4. QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA UMA COBERTURA PLANA

A cobertura plana 4, também é uma cobertura invertida, e a sua constituição é praticamente igual à cobertura anterior (cobertura plana 3), apenas com a diferença de, neste caso, a impermeabilização fica a cargo da manta asfáltica (*asphalt shingle system*) ao invés da membrana em PVC.

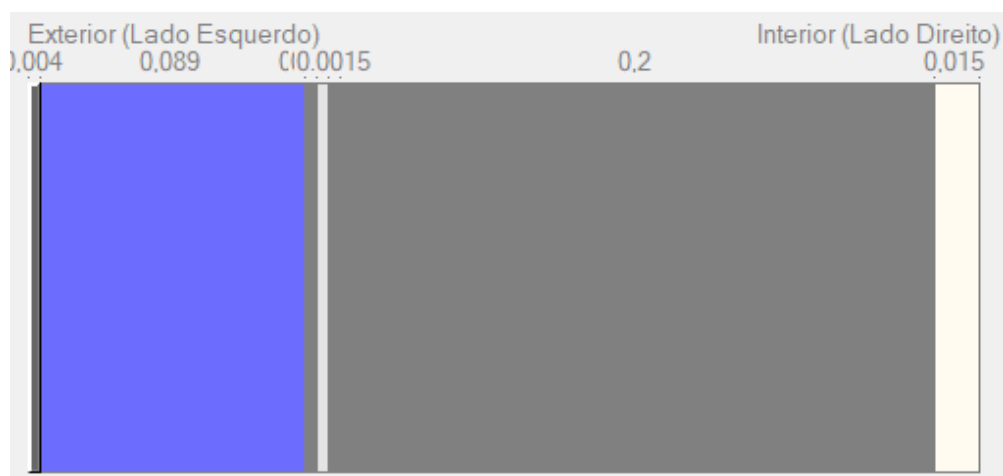


Fig. 4.13 - Esquema construtivo da cobertura plana 4

De seguida é apresentado o Quadro 4.12 com as propriedades dos materiais da cobertura plana 4:

Material/Camada	Brita granítica	Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	Isolamento com poliestireno extrudido	Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	Membrana asfáltica (Asphalt Shingle System)	Betão armado	Gesso cartonado
Densidade Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1500	1960	28,6	1960	1500	2220	850
Porosidade (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,001	0,23	0,99	0,23	0,001	0,18	0,65
Calor Específico (J/KgK)	1500	850	1470	850	1500	850	850
Condutibilidade Térmica (W/mK)	0,2	1,6	0,025	1,6	0,2	1,6	0,2
Fator de resistência à difusão de Vapor de água	2730	18	170,56	18	2730	248	8,3
Espessura da camada (m)	0,004	0,001	0,089	0,001	0,004	0,2	0,015

Quadro 4.12 - Propriedades dos materiais utilizados na cobertura plana 4

# 5

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS NO PROGRAMA WUFI

### 5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados obtidos nas simulações que foram efetuadas para as dez diferentes soluções construtivas definidas para coberturas. Foram realizadas várias simulações, de forma experimental, de modo a encontrar o melhor compromisso no que aos dados de entrada diz respeito, sendo que foram experimentadas várias inclinações para a cobertura, vários materiais, diversas soluções construtivas, e testados alguns períodos de simulação, entre outros, até encontrar a melhor combinação possível que simule com o maior rigor e realismo possível, o que acontece realmente num edifício corrente. No entanto, e apesar de ser um trabalho académico, foi tido sempre em conta o que acontece na realidade. Assim, tentou-se ao máximo replicar aquilo que verdadeiramente acontece numa construção de uma cobertura.

Durante este capítulo serão analisados os gráficos finais, que contém a informação relativa à Humidade Relativa, Teor de Humidade, bem como o Filme da Simulação (que nos é apresentado, pelo programa, no final de cada simulação) para cada uma das dez tipologias construtivas.

### 5.2. ESPECIFICIDADES DO PROGRAMA WUFI.

#### 5.2.1. DADOS DE SAÍDA

O programa WUFI será utilizado com o objetivo de avaliar o comportamento à humidade das dez diferentes constituições de cobertura definidas. Para isso serão analisados resultados como a Humidade Relativa, o Teor de Humidade geral e o Teor de Humidade por camadas.

No programa WUFI não é necessário selecionar os dados de saída como condição para o programa correr. Decorrido o tempo necessário para cada simulação, seleciona-se a informação que se pretende exportar para análise, tal como demonstra a Fig. 5.1.



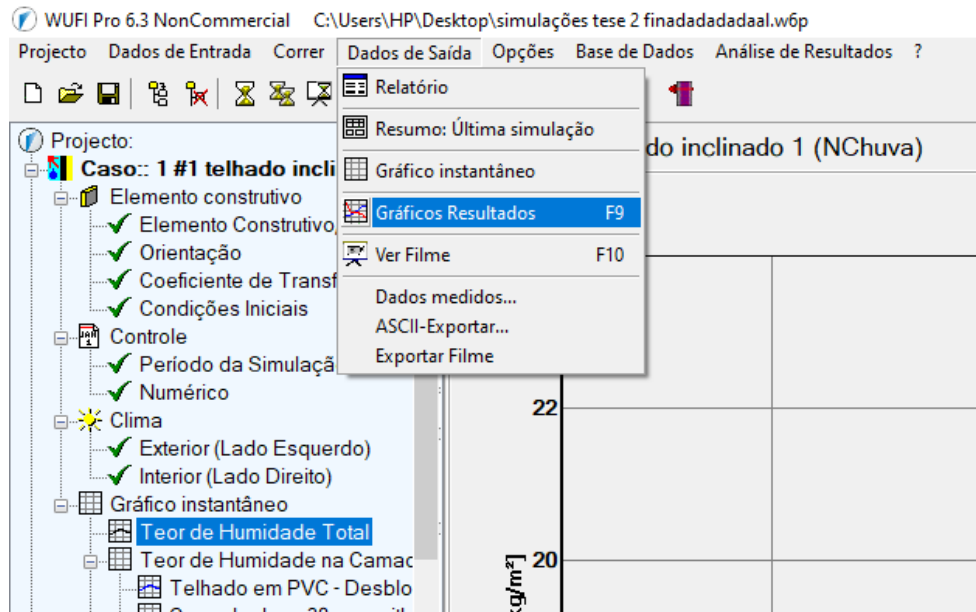


Fig. 5.1 - Seleção de dados de saída no programa WUFI

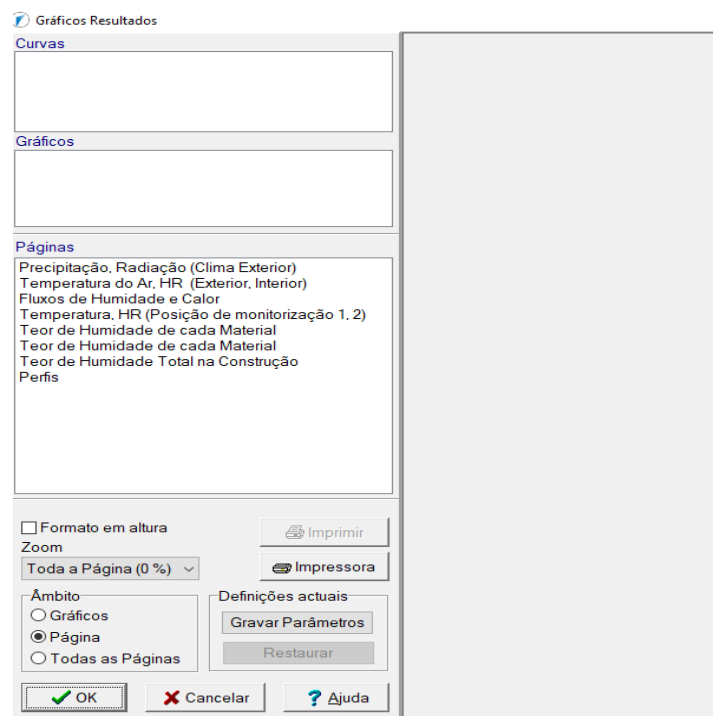


Fig. 5.2 - Dados de saída disponíveis no programa WUFI

### 5.2.2. MALHA UTILIZADA

A grelha definida num programa de simulação numérica influencia a forma como os dados de saída serão traduzidos uma vez que quanto menos espaçada, mais pontos serão lidos ao longo da sua espessura e consequentemente maior precisão o autor terá nos resultados finais.

A Fig. 5.3 mostra que, no programa WUFI, o tipo de grelha utilizado, também denominada como malha, é automático.

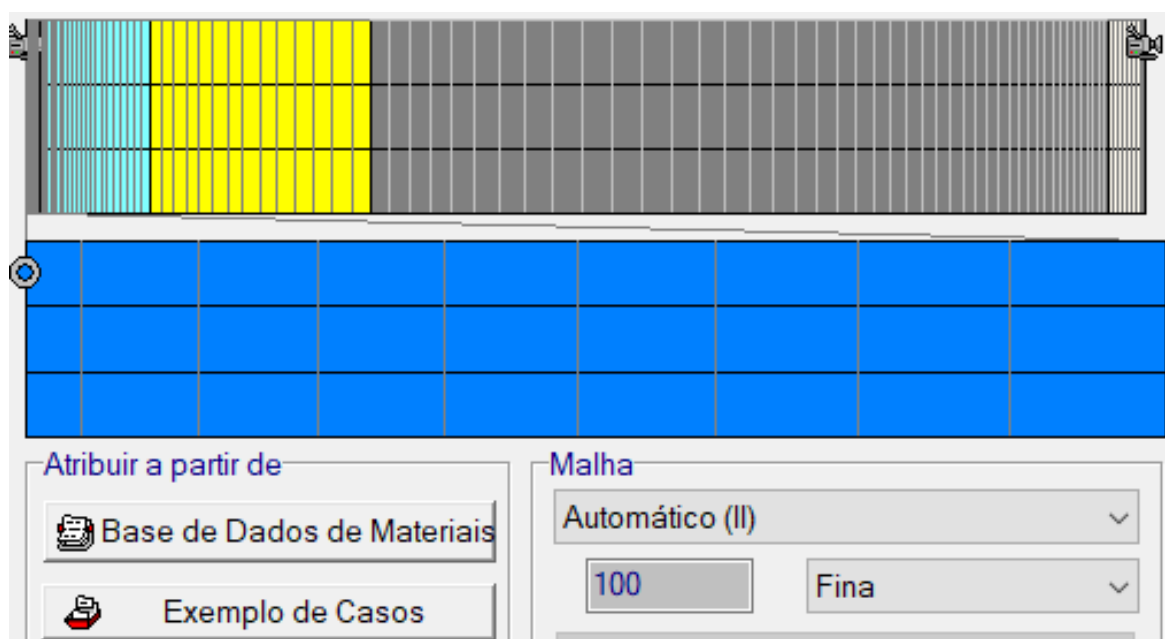


Fig. 5.3 - Malha utilizada em cada simulação

### 5.2.3. CLIMA EXTERIOR UTILIZADO EM CADA SIMULAÇÃO

Como mencionado anteriormente, é necessário selecionar a localização geográfica onde se pretende efetuar o estudo. No presente trabalho foi selecionada a cidade de Lisboa, visto ser o único sítio em solo português disponível no programa WUFI. O programa tem uma base de dados que contém todas as informações relativamente às condições climáticas desta cidade, que vão desde a precipitação, radiação solar, temperatura exterior do ar, humidade relativa exterior, vento, entre outros. Assim, nas Fig. 5.4 e Fig. 5.5 pode ser observada as condições utilizadas em cada simulação relativamente às variáveis explicitadas anteriormente.

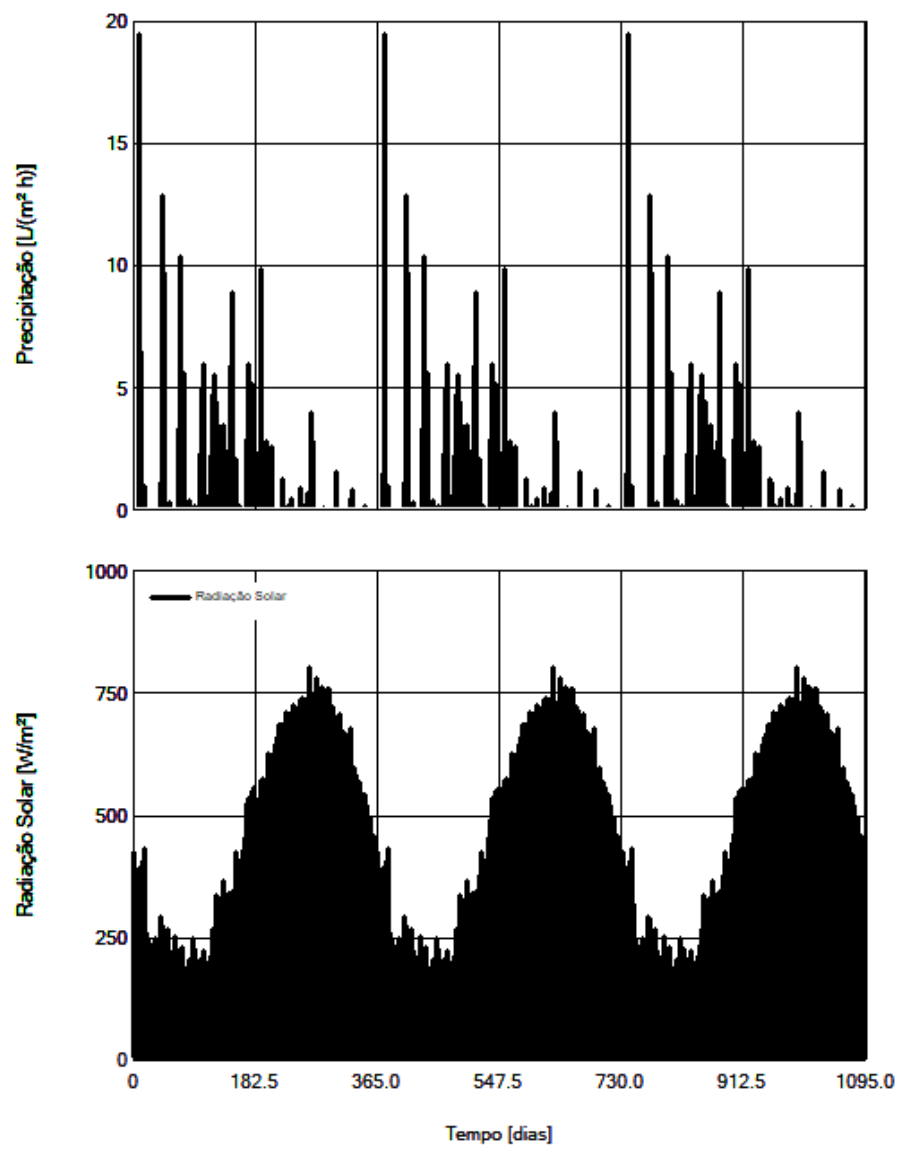


Fig. 5.4 - Precipitação e radiação solar utilizado em cada simulação

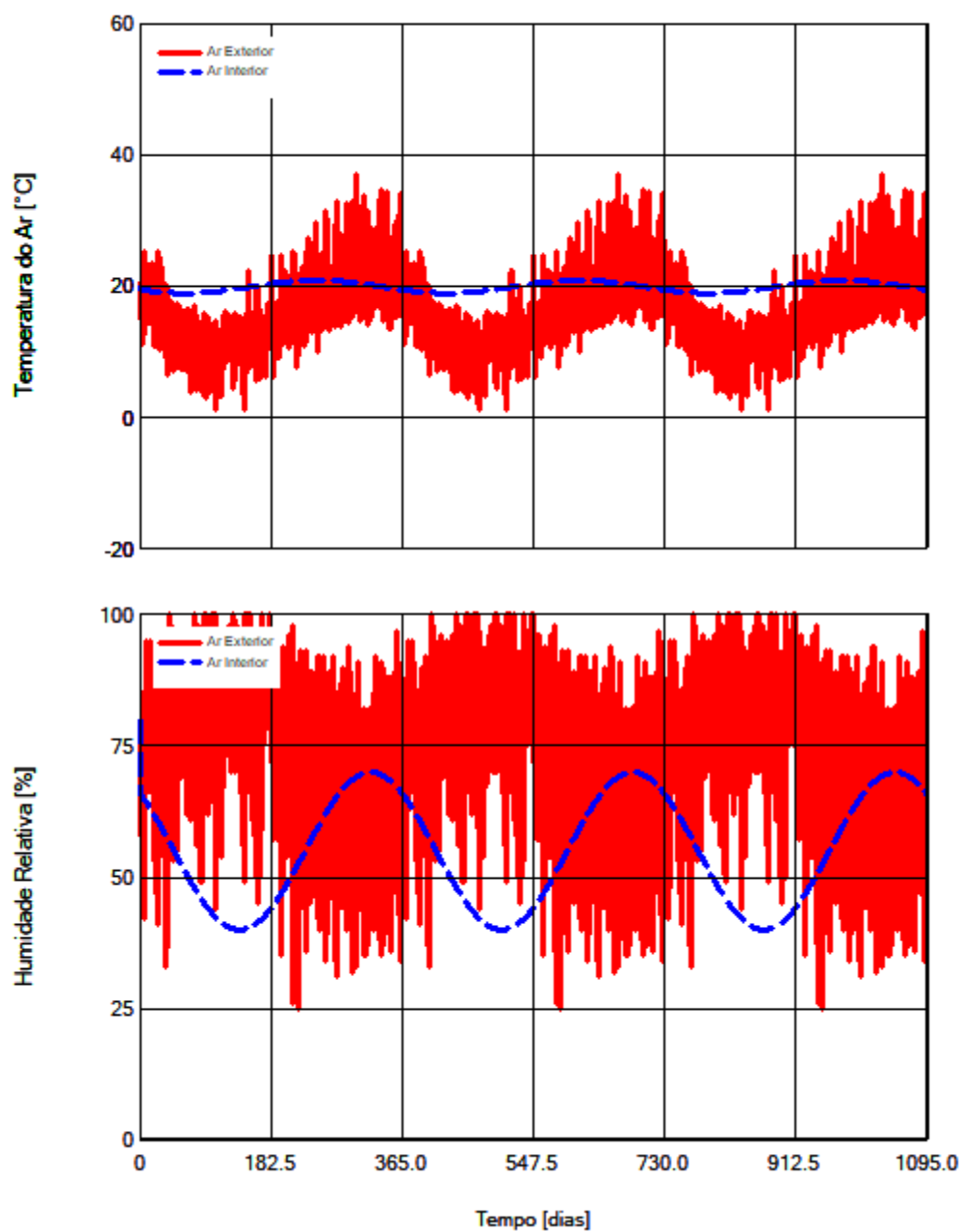


Fig. 5.5 - Temperatura e humidade relativa considerado em cada simulação

### 5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EFETUADAS PARA CADA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA DE COBERTURAS

#### 5.3.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

O gráfico do teor de humidade total da primeira solução construtiva é apresentado na Fig. 5.6:

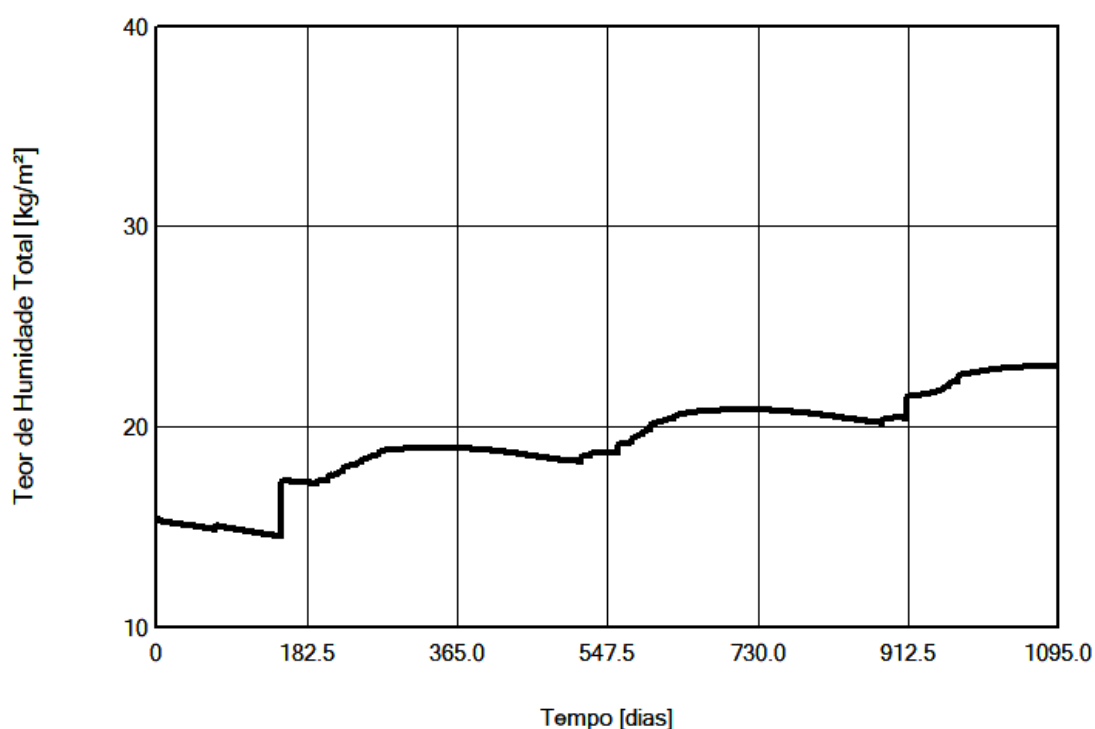


Fig. 5.6 - Gráfico do teor de humidade total na cobertura 1 sem a barreira pára-vapor (1\_CI\_PVC\_XPS)

De seguida, a Fig. 5.7 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação da primeira solução construtiva.

Teor de Humidade [kg/m²]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,46	22,99	14,53	23,01

Teor de Humidade [kg/m³]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*Telhado em PVC - Desbloquear	0,00	0,00	0,00	0,02
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	289,29	0,01	298,45
XPS Placa de poliestireno extrudido(Conduct. ao c	1,79	7,27	1,79	7,37
Cimento, C35/45	75,00	68,51	65,95	75,00
Gesso de cimento (Estuque, A-value: 0.51 kg/m2h	35,00	17,67	7,27	35,00

Fig. 5.7 - Valores do teor de humidade total e por camadas da cobertura inclinada 1 (1\_CI\_PVC\_XPS)

Durante uma simulação, com uma duração total de 3 anos, é nos apresentado um gráfico, denominado por “filme da simulação”, que contém os valores da temperatura exterior, Teor de Humidade e Humidade Relativa, por camada consoante a localização temporal que se encontra a simulação. Desta

forma, conforme a simulação vai progredindo, conseguimos ver “em tempo real” a evolução dos parâmetros referidos anteriormente. A Fig. 5.8 representa o filme da simulação para a cobertura inclinada 1 sem barreira pára-vapor (1\_CI\_PVC\_XPS), e a Fig. 5.9 corresponde ao filme da simulação para a cobertura inclinada 1 com barreira pára-vapor (1\_CI\_PVC\_XPS\_PV-POLI).

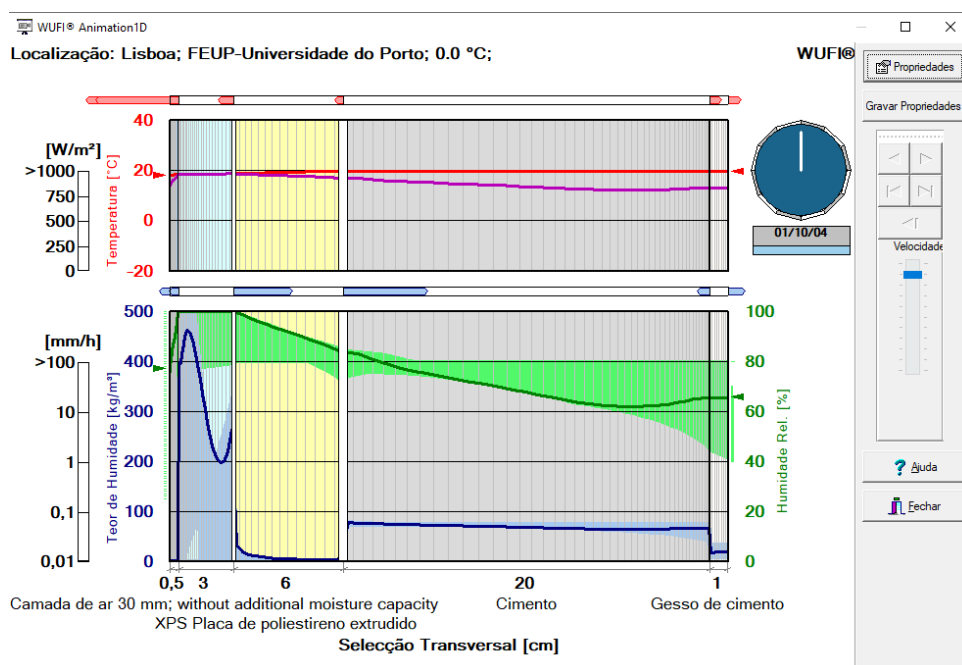


Fig. 5.8 - Filme da simulação da cobertura inclinada 1 sem barreira pára-vapor (1\_CI\_PVC\_XPS)

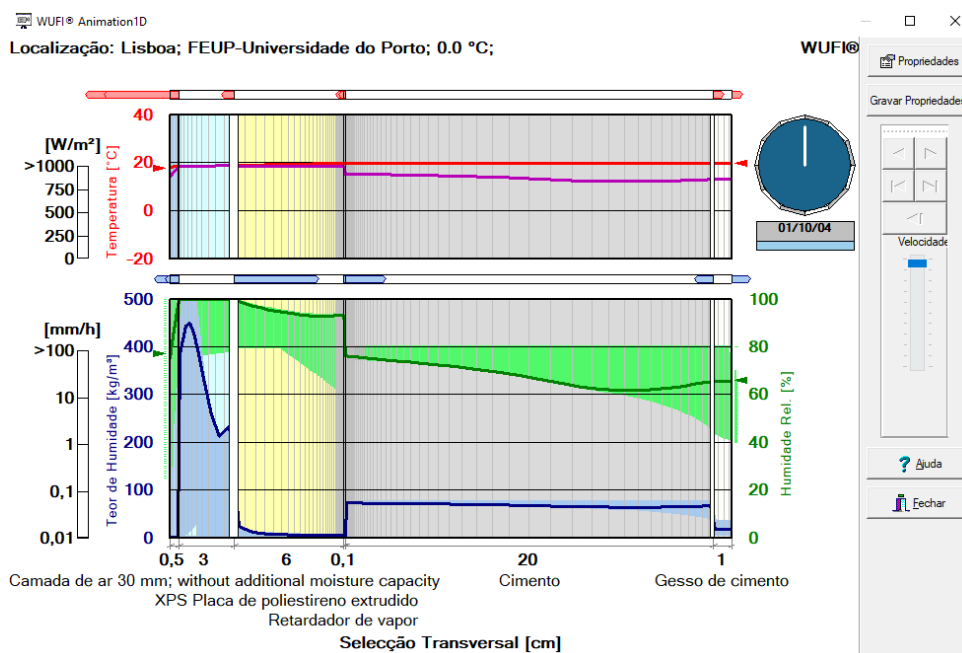


Fig. 5.9 - Filme da simulação da cobertura inclinada 1 com barreira pára-vapor

### 5.3.1.1. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A COBERTURA INCLINADA 1

Observando o gráfico do teor de humidade total, Fig. 5.6, constatamos que o teor de humidade aumenta de forma regular durante todo o período de simulação, neste caso 3 anos. O que não satisfaz as necessidades dos utilizadores do edifício. É possível, também, verificar que o valor do teor de humidade tende a aumentar, após os 3 anos de simulação efetuados, visto que, pela Fig. 5.7, o valor máximo e o valor final do teor de humidade são praticamente iguais.

No filme da simulação, Fig. 5.8, é observado que na caixa de ar e uma parte do isolamento térmico em XPS a Humidade Relativa é máxima, 100%, o que significa que há a ocorrência de condensações nestas camadas, o que é de todo de evitar na construção de uma cobertura. Este acontecimento é facilmente explicado uma vez que foi utilizada um revestimento exterior em PVC que funciona como barreira pára-vapor e não deixa a cobertura “respirar”. Nestas circunstâncias, ou teria de se considerar uma barreira para-vapor abaixo do isolamento ou/e ventilar a caixa de ar por baixo do PVC, de modo a tentar impedir a ocorrência destas condensações.

No entanto pela Figura 58, podemos que os níveis de humidade relativa não variam de forma significativa, no entanto é de notar que tanto os valores máximos e mínimos deste parâmetro, aumentaram com a introdução da barreira pára-vapor.

### 5.3.2. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

A Fig. 5.10 representa o gráfico do teor de humidade total da segunda solução construtiva:

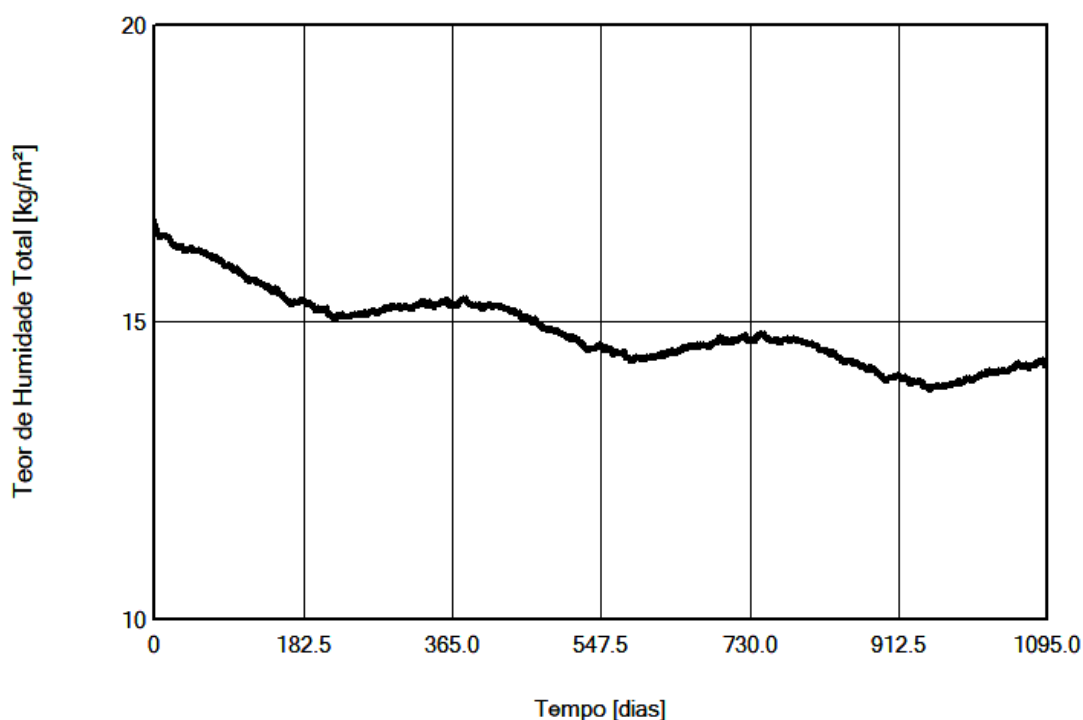


Fig. 5.10 - Gráfico do Teor de Humidade da cobertura inclinada 2 durante a simulação

A Fig. 5.11 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	16,69	14,3	13,85	16,69

Teor de Humidade [kg/m <sup>3</sup> ]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*Painel de fibro-cimento - Desbloquear	95,00	83,97	77,93	104,10
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	0,01	0,01	0,01
XPS Placa de poliestireno extrudido(Conduct. ao d	1,79	0,91	0,70	1,79
Cimento, C35/45	75,00	64,87	62,99	75,00
Gesso de cimento (Estuque, A-value: 0.51 kg/m2h	35,00	17,67	7,26	35,00

Fig. 5.11 - Valores do Teor de Humidade total e por camadas da cobertura inclinada 2

O filme da segunda simulação encontra-se na seguinte Fig. 5.12:

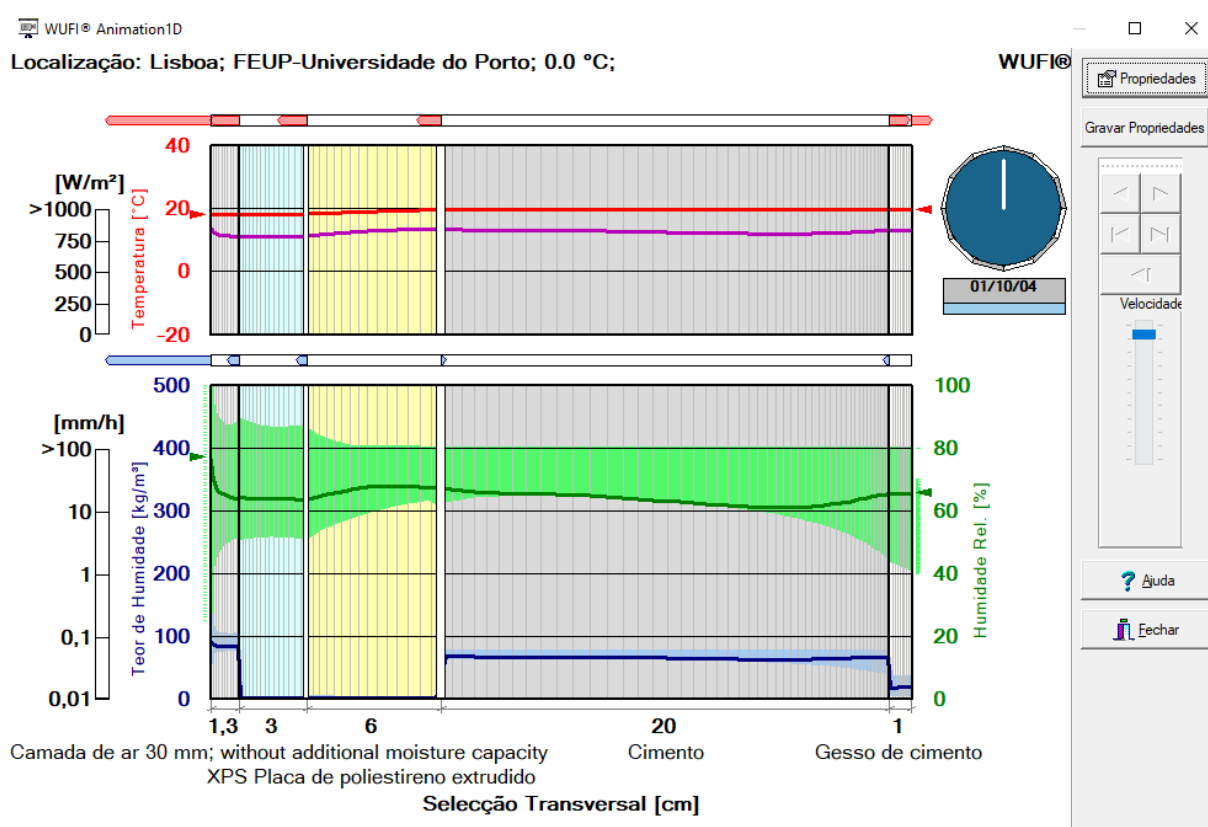


Fig. 5.12 - Filme da simulação da cobertura inclinada 2



### 5.3.2.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA A COBERTURA INCLINADA 2

Nesta cobertura, após a realização da simulação no programa WUFI, constatamos que existe uma gradual diminuição do teor de humidade total no elemento construtivo, como demonstra a Fig. 5.10. Podemos, também, concluir que a tendência é uma diminuição do teor de humidade para além dos três anos de simulação, visto que o teor de humidade inicial é significativamente inferior ao teor de humidade final. Assim, esta é uma solução construtiva que satisfaz as necessidades do utilizador no que ao teor de humidade diz respeito.

Pela análise do “filme da simulação”, podemos notar que em todas as camadas da presente solução construtiva não existem valores de humidade relativa na ordem dos 100% (este valor oscila maioritariamente entre os 80 % e os 60%), e, desta forma, não existem condensações em nenhuma camada.

### 5.3.3.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

A Fig. 5.13 representa o gráfico do teor de humidade total da terceira solução construtiva:

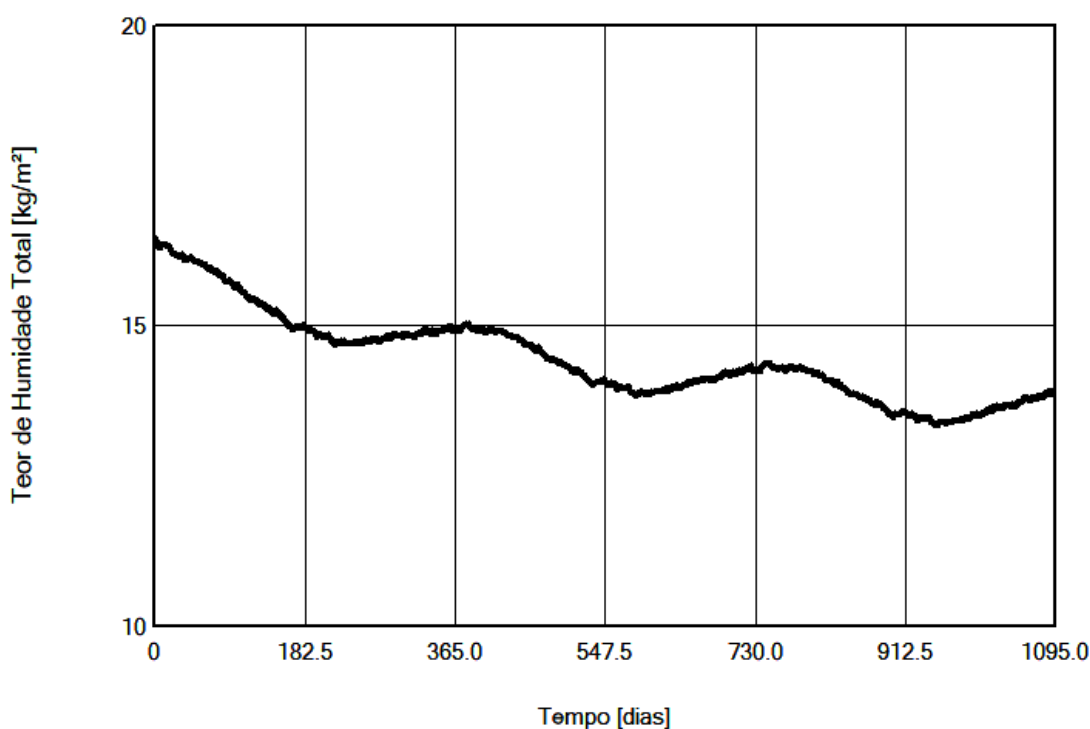


Fig. 5.13 - Gráfico do teor de Humidade da cobertura inclinada 3 durante a simulação

A Fig. 5.14 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m³]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	16,47	13,88	13,34	16,47

Teor de Humidade [kg/m³]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*Painel de fibro-cimento - Desbloquear	95,00	83,87	77,42	108,88
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	0,01	0,01	0,02
Lã mineral (Conduct. ao calor.: 0,04 W/mK)	1,79	0,85	0,60	1,79
Cimento, C35/45	75,00	63,24	60,43	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,22	3,03	6,30

Fig. 5.14 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 3

O filme da simulação da cobertura inclinada 3 sem barreira pára-vapor (3\_CI\_FB\_LA ) encontra-se na seguinte Fig. 5.15:

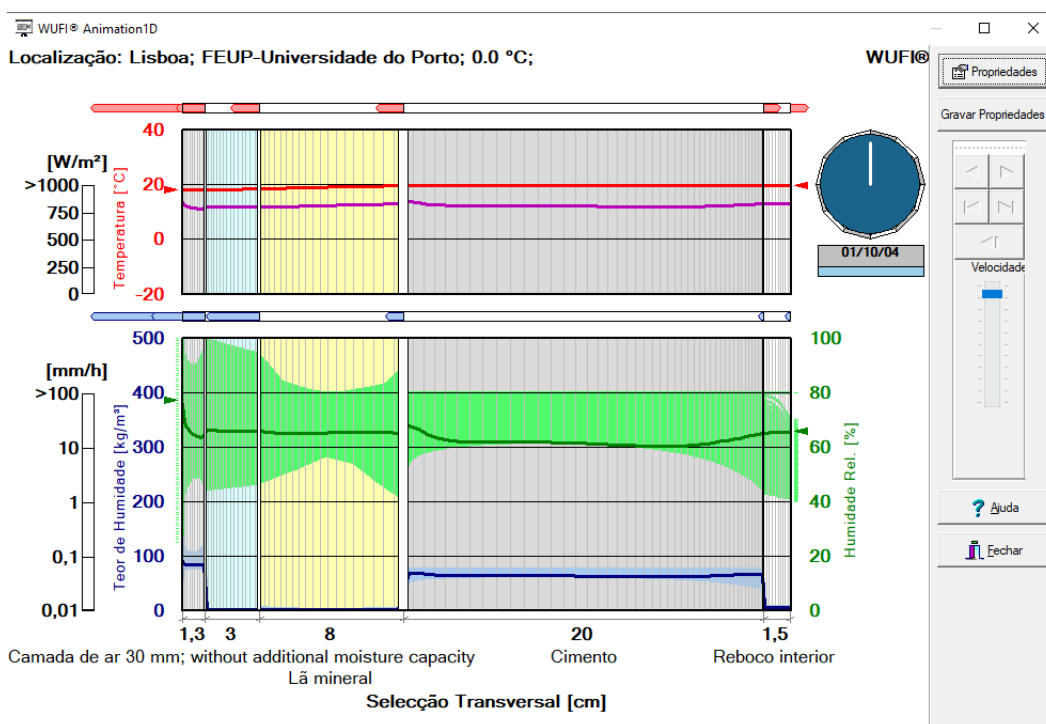


Fig. 5.15 - Filme da simulação da cobertura inclinada 3 sem barreira pára-vapor

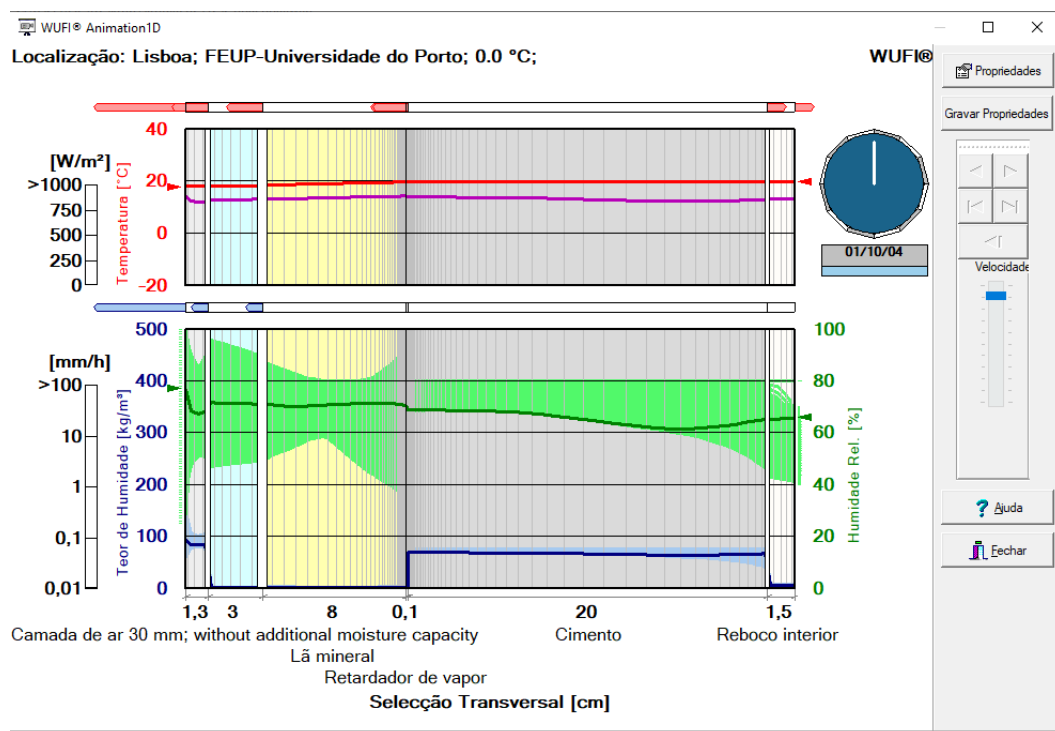


Fig. 5.16 - Filme da simulação da cobertura inclinada 3 com barreira pára-vapor (3\_CI\_FB\_LA\_PV)

#### 5.3.3.1. COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Pela análise da Fig. 5.13, observa-se uma gradual diminuição do teor de humidade durante o período de simulação. No entanto é possível identificar umas pequenas oscilações, que são explicadas devido às quatro estações do ano, que tem condições climáticas substancialmente diferentes entre elas.

Na Fig. 5.14 facilmente detetamos que a tendência é uma diminuição do teor de humidade total na solução construtiva para além dos três anos de simulação, visto o teor de humidade final ser muito idêntico ao mínimo e substancialmente diferente do inicial. É, também, possível observar que, excetuando a telha em fibrocimento, os valores do teor de humidade das várias camadas são bastante satisfatórios, o que torna esta cobertura uma solução plausível de ser utilizada.

O filme da simulação, Fig. 5.15, mostra que a humidade relativa na maioria das camadas, não toma valores que se traduzam em condensações interiores. No entanto, a caixa de ar de 30 mm apresenta valores para este parâmetro muito próximos do máximo, 100%, o que constitui uma forte possibilidade da ocorrência de condensações interiores. Este fenómeno, pode ser explicado, devido à impossibilidade de, na altura da escolha dos materiais constituintes da cobertura, não ser possível a escolha de uma camada de ar ventilada.

Comparando a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e a **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** podemos observar que há uma expressiva diminuição da humidade relativa ao se colocar a barreira pára-vapor no elemento construtivo, principalmente na camada do isolamento térmico em lã mineral.

#### 5.3.4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

A Fig. 5.17 representa o gráfico do teor de humidade total da quarta solução construtiva:

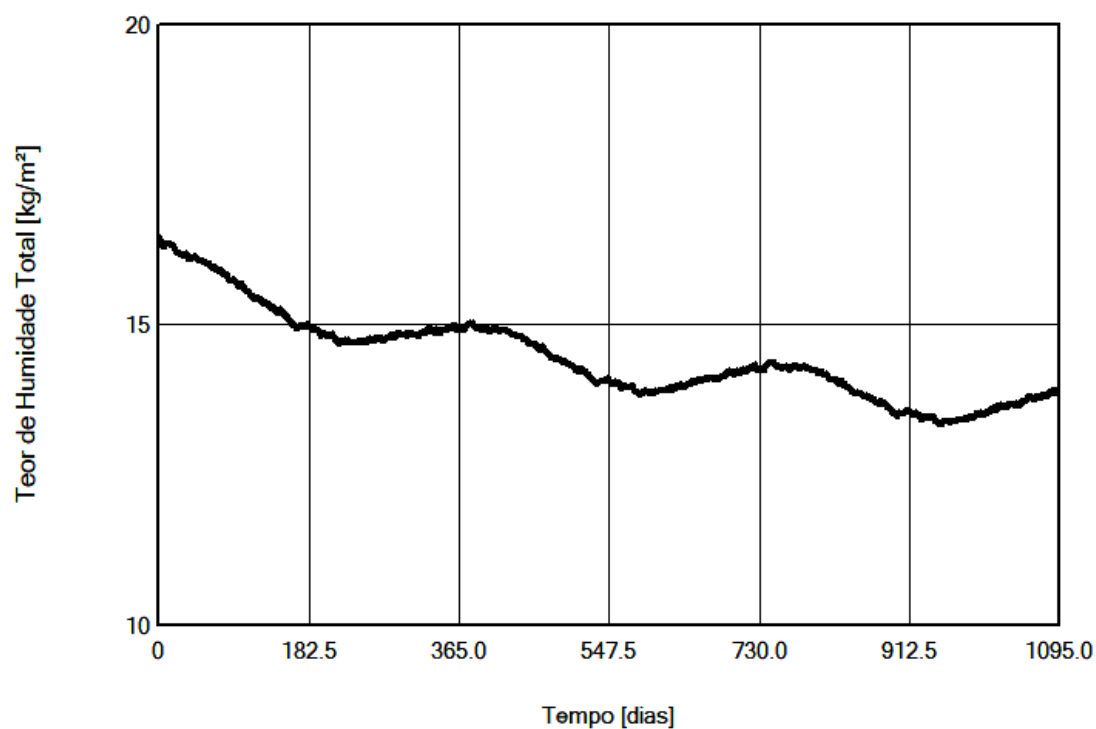


Fig. 5.17 - Gráfico do teor de humidade da cobertura inclinada 4 durante o período de simulação

A Fig. 5.18 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m³]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	17,09	14,97	13,72	21,24

Teor de Humidade [kg/m³]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*telha de barro - Desbloquear	142,27	137,53	131,68	459,89
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	0,01	0,01	4,43
Lã mineral (Conduct. ao calor.: 0,04 W/mK)	1,79	1,50	1,29	5,91
Cimento, C35/45	75,00	64,94	57,14	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,22	3,10	6,30

Fig. 5.18 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 4

O filme da simulação da cobertura inclinada 4 sem barreira pára-vapor encontra-se na seguinte Fig. 5.19:

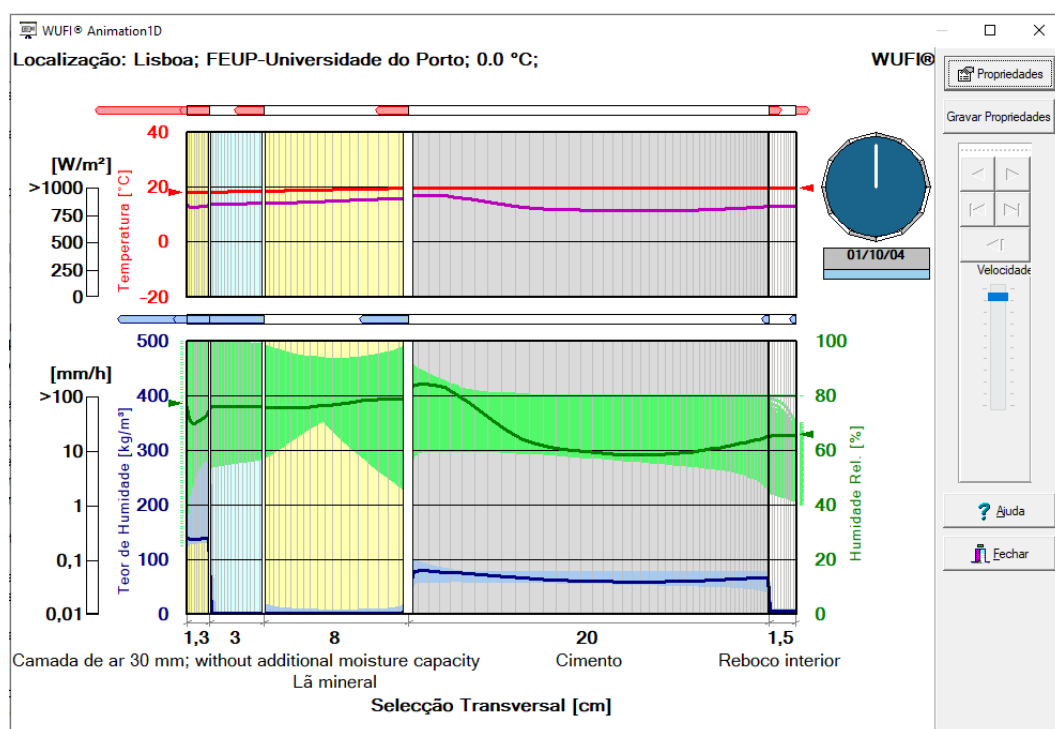


Fig. 5.19 - Filme da simulação da cobertura inclinada 4 sem a barreira pára-vapor (4\_CI\_CE\_LA)

O filme da simulação da cobertura 4 com barreira pára-vapor (4\_CI\_CE\_LA\_PV) encontra-se na Fig. 5.20:

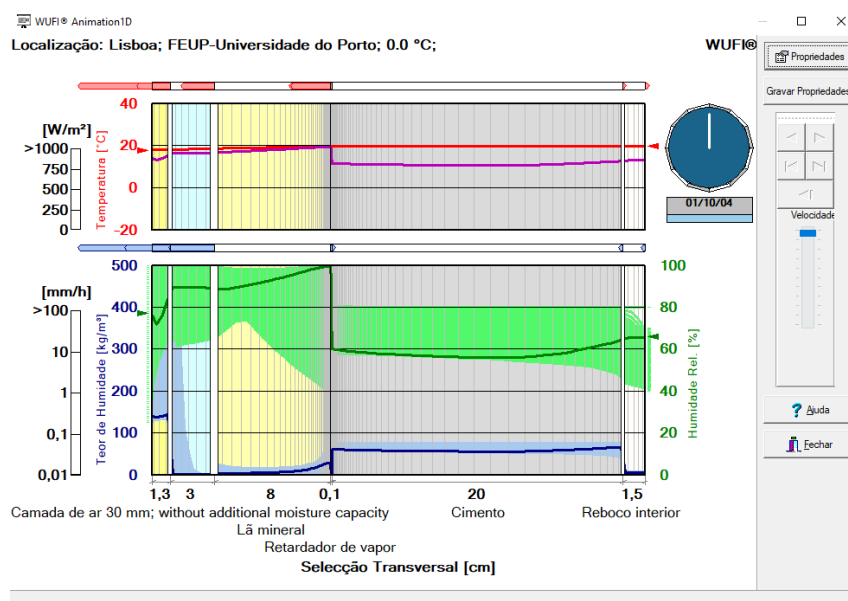


Fig. 5.20 - Filme da simulação da cobertura 4 com barreira pára-vapor (4\_CI\_CE\_LA\_PV)

#### 5.3.4.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

O gráfico do teor de humidade total para esta solução construtiva é em tudo idêntico ao da cobertura inclinada 3, no entanto, pela análise da Fig. 5.17 salta à vista os valores demasiado elevados do teor de humidade máximo na telha de barro. No que respeita aos restantes valores, estes assumem valor perfeitamente aceitáveis.

Pela observação do filme da simulação da cobertura inclinada 4, verifica-se que os valores da humidade relativa tendem a ser consideravelmente elevados (camada de lã mineral, caixa de ar e telha em barro), sendo que nas duas primeiras este parâmetro atinge o valor máximo, originando desta forma a ocorrência de condensações interiores.

Neste caso, a colocação da barreira pára-vapor por baixo do isolamento, não teve repercussões significativas, tendo até aumentado o intervalo de variação da humidade relativa, isto é, provocou que o valor da humidade relativa máximo aumentasse e o valor da humidade relativa mínimo diminuísse, comparando com a cobertura inclinada 4 sem barreira pára-vapor.

#### 5.3.5.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUINTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

A Fig. 5.21 representa o gráfico do teor de humidade total da terceira solução construtiva:

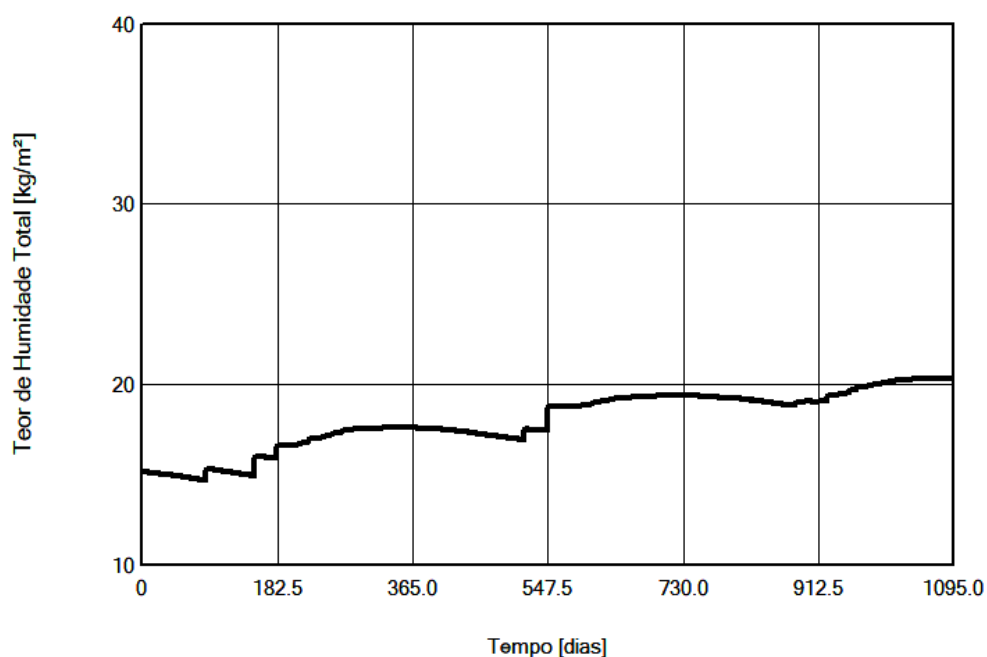


Fig. 5.21 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura inclinada 5 durante o período de simulação

A Fig. 5.22 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m²]

	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,19	20,35	14,67	20,36

Teor de Humidade [kg/m³]

Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*telha metalica - Desbloquear	0,00	0,01	0,00	0,06
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	205,70	0,01	214,45
Espuma pulverizada de poliuretano; Célula fechada	1,12	5,17	1,12	5,27
Cimento, C35/45	75,00	68,21	65,45	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,23	3,00	6,30

Fig. 5.22 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 5

O filme da simulação da cobertura inclinada 5 sem barreira pára-vapor (5\_CI\_MZ\_PU\_PV<) encontra-se na Fig. 5.23.

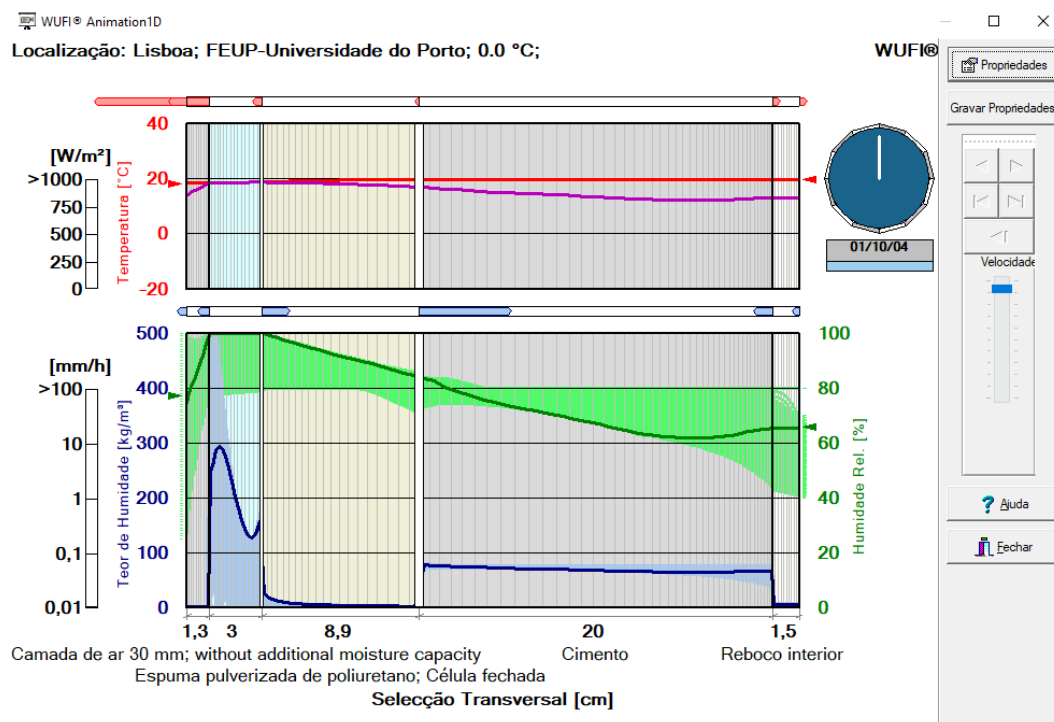


Fig. 5.23 - Filme da simulação da cobertura inclinada 5 sem barreira pára-vapor

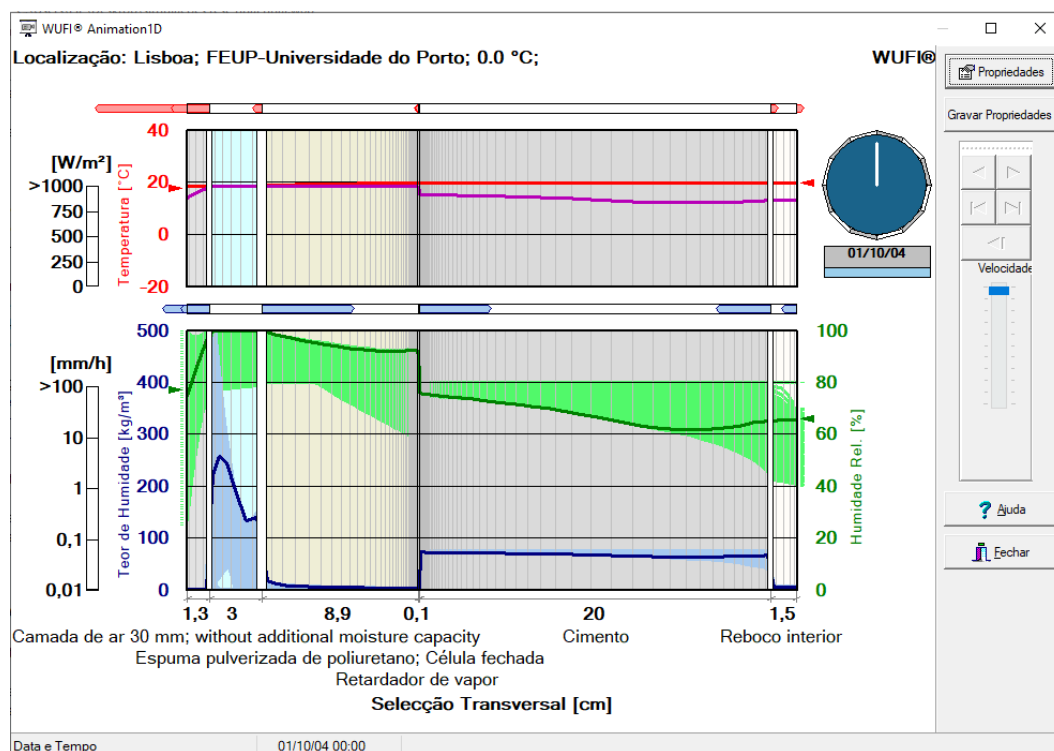


Fig. 5.24 - Filme da simulação da cobertura inclinada 5 com barreira pára-vapor



### 5.3.5.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A análise da Fig. 5.21 revela um aumento progressivo do teor de humidade total na cobertura inclinada 5. Os dados da Fig. 5.22 revelam que o teor de humidade total final e máximo se diferenciam apenas numa centésima, o que mostra que a tendência é a continuidade do aumento dos valores deste parâmetro, o que não é de todo satisfatório para o objetivo deste trabalho.

O filme da simulação da cobertura inclinada 5 mostra que o valor da humidade relativa é máximo nas camadas “telha metálica” e “caixa de ar”, e nos primeiros centímetros da “espuma pulverizada de poliuretano”, pelo que nestes materiais referidos há a ocorrência de condensações superficiais.

Comparando as duas figuras anteriores, e, tal como na cobertura anterior, não se nota diferenças significativas com a colocação da barreira pára-vapor. No entanto houve, novamente, um aumento da janela de oscilação da humidade relativa, que é bastante perceptível na camada do isolamento térmico.

### 5.3.6.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEXTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS INCLINADAS

A Fig. 5.25 representa o gráfico do teor de humidade total da terceira solução construtiva:

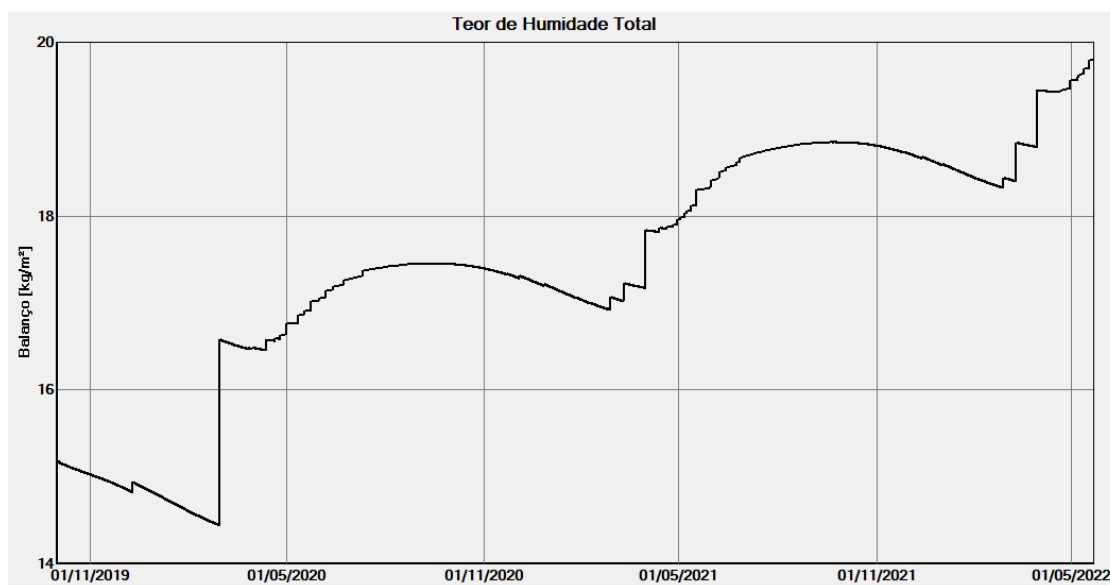


Fig. 5.25 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura inclinada 6 durante o período de simulação

A Fig. 5.26 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,19	20,9	14,6	20,9

Teor de Humidade [kg/m <sup>3</sup> ]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
*telha metálica - Desbloquear	0,00	0,00	0,00	0,18
Camada de ar 30 mm; without additional moisture	0,01	226,06	0,01	237,75
Espuma pulverizada de poliuretano; Célula fechada	1,12	6,29	1,09	6,29
Retardador de vapor (sd=1500m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Cimento, C35/45	75,00	67,40	65,75	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,23	3,00	6,30

Fig. 5.26 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura inclinada 6

O filme da simulação da cobertura inclinada 6 (6\_CI\_MZ\_PU\_PV>) encontra-se representado na Fig. 5.27:

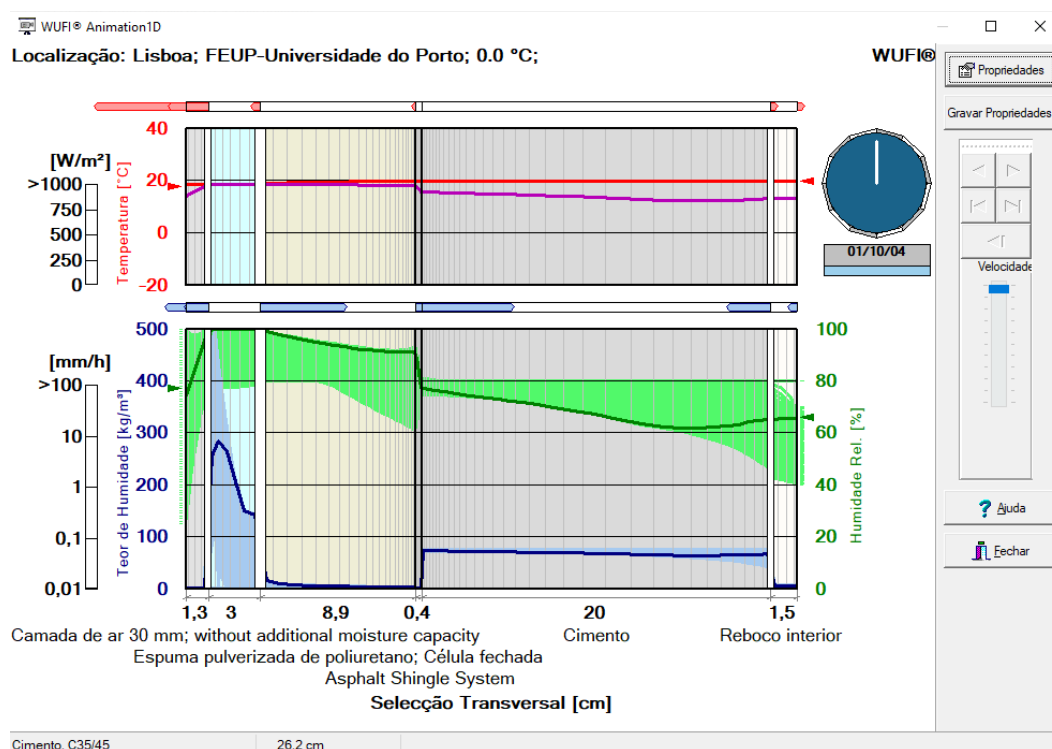


Fig. 5.27 - Filme da simulação da cobertura inclinada 6

### 5.3.6.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Tal como na solução construtiva anterior, o teor de humidade total desta cobertura aumenta constantemente ao longo da simulação. No entanto, neste caso, é visível um aumento mais acentuado, pela Fig. 5.25.

Na Fig. 5.26 tem-se que o valor do teor de humidade total final é igual ao valor máximo, o que leva a crer que a tendência é de um aumento similar ao ocorrido durante a simulação. De destacar o valor do teor de humidade da camada “caixa de ar de 30 mm”, visto ter valores demasiado altos em comparação com as restantes camadas.

Pela a análise do filme da simulação, é perceptível um aumento abrupto do teor de humidade entre a camada “telha metálica” e “caixa de ar de 30 mm”, sendo que em ambas a humidade relativa atinge valores máximos, que se traduzem na ocorrência de condensações superficiais nestas camadas.

### 5.3.7.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA PRIMEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS

A Fig. 5.28 representa o gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 1 (1\_CPT\_PVC\_XPS\_PV-POLI):

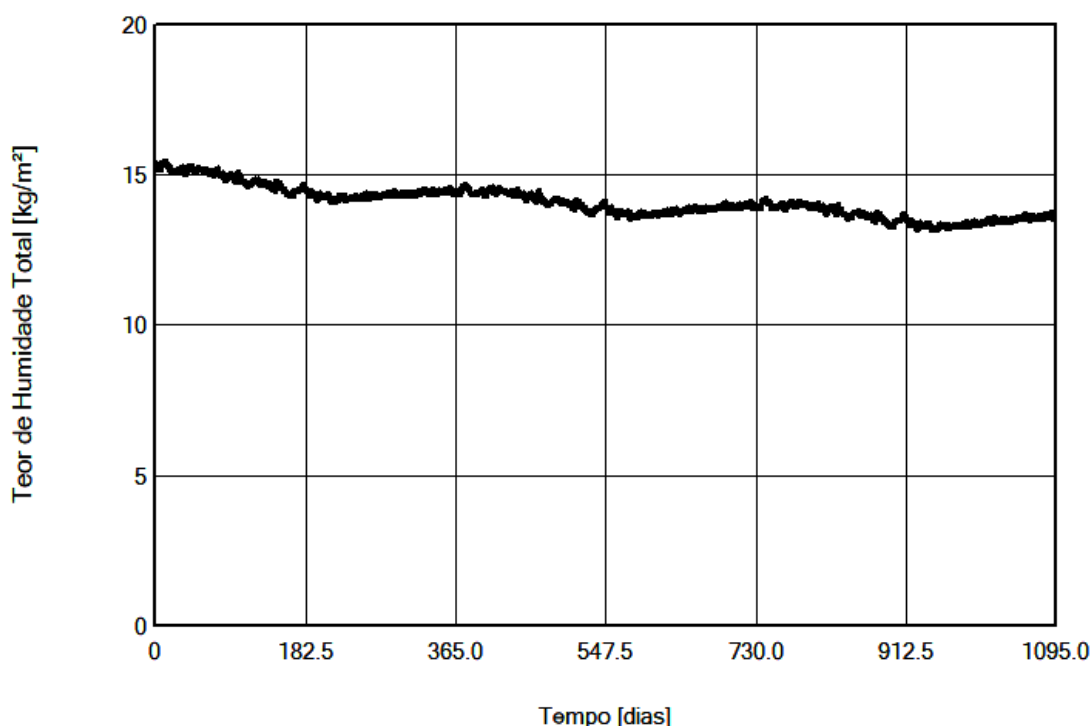


Fig. 5.28 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 1 (1\_CPT\_PVC\_XPS\_PV-POLI) durante a simulação

A Fig. 5.29 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m³]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,39	13,6	13,13	15,45

Teor de Humidade [kg/m³]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
generic gravel	5,00	3,02	0,65	11,63
PVC membrane	0,00	0,00	0,00	0,01
Isolamento com poliestireno extrudido	0,31	0,22	0,18	0,46
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada superior	7,30	5,98	4,29	7,35
Retardador de vapor (sd=20m)	0,00	0,00	0,00	0,00
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada inferior	5,90	4,62	4,61	5,90
Cimento, C35/45	75,00	66,69	64,97	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,21	3,00	6,30

Fig. 5.29 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 1 (1\_CPT\_PVC\_XPS\_PV-POLI)

O filme da simulação da cobertura plana 1 (1\_CPT\_PVC\_XPS\_PV-POLI) encontra-se representado na Fig. 5.30:

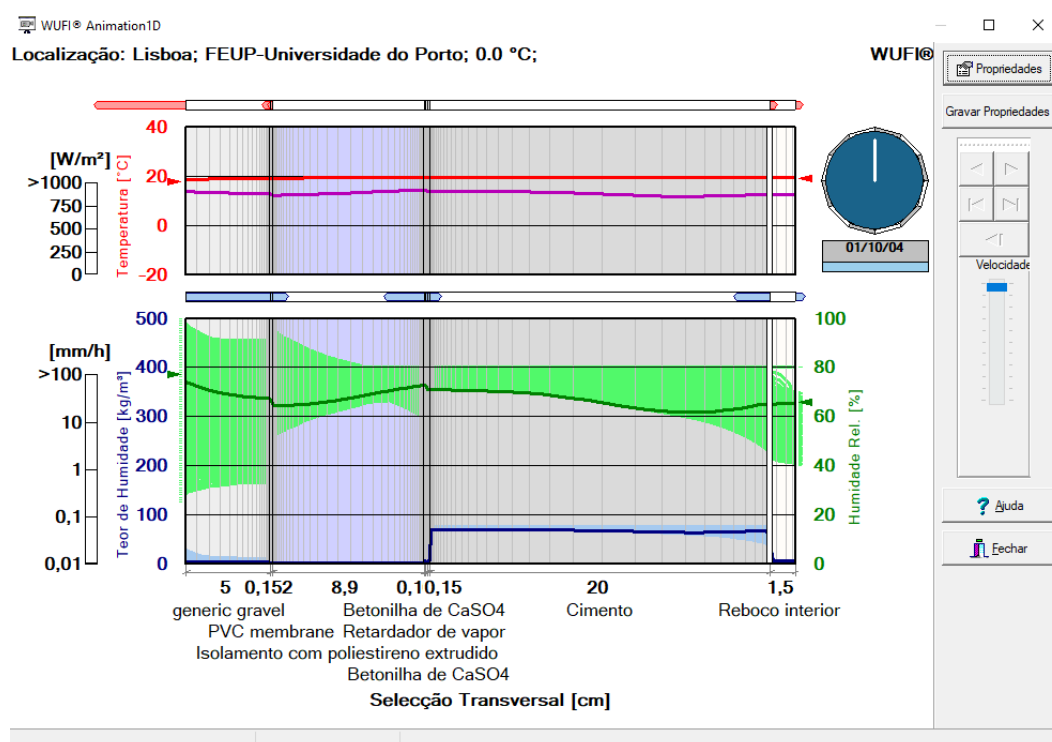


Fig. 5.30 - Filme da simulação da cobertura plana 1 (1\_CPT\_PVC\_XPS\_PV-POLI)

### 5.3.7.1.COMENTÁRIO FINAL PARA OS RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 5.28 mostra-nos que ao longo do período de simulação, o teor de humidade total para esta cobertura vai reduzindo gradualmente, o que é positivo para o objetivo deste trabalho.

A Fig. 5.29 prova que os valores do teor de humidade total e por camadas tem valores bastante reduzidos, sendo de referir que o valor mínimo do teor de humidade é bastante próximo do valor final, o que leva a crer que a tendência futura seria a continuação da diminuição deste valor, que torna esta solução eficaz, no que à humidade diz respeito.

A observação do filme da simulação, revela que a humidade relativa nunca atingiu o valor máximo (100%), tornando assim, menos provável a ocorrência de condensações interiores e entre camadas

### 5.3.8.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA SEGUNDA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS

A Fig. 5.31 representa o gráfico do teor de humidade total da primeira solução construtiva:

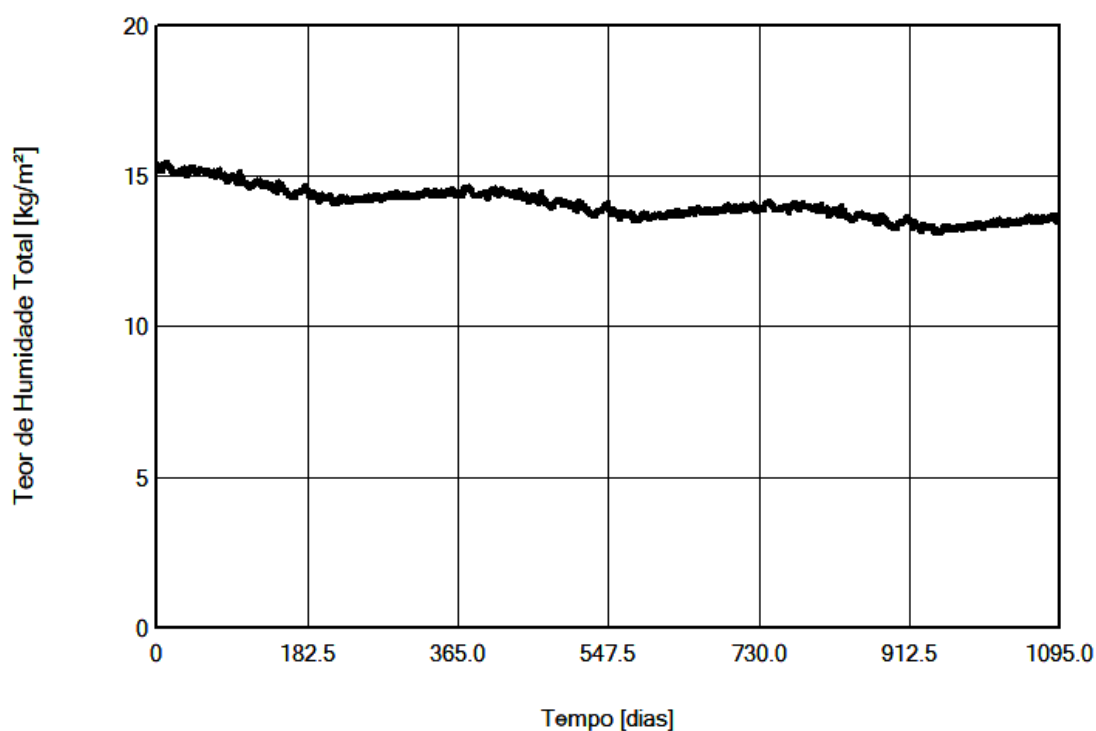


Fig. 5.31 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 2 durante a simulação

A Fig. 5.32 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,39	13,58	13,11	15,45

Teor de Humidade [kg/m <sup>3</sup> ]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
generic gravel	5,00	3,02	0,66	11,75
Asphalt Shingle System	0,00	0,00	0,00	0,00
Isolamento com poliestireno extrudido	0,31	0,22	0,17	0,42
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada superior	7,30	5,97	4,31	7,30
PVC membrane	0,00	0,00	0,00	0,00
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada inferior	5,90	4,57	4,55	5,90
Cimento, C35/45	75,00	66,58	64,89	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,21	3,00	6,30

Fig. 5.32 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 2

O filme da simulação da cobertura plana 2 encontra-se apresentado na Fig. 5.33:

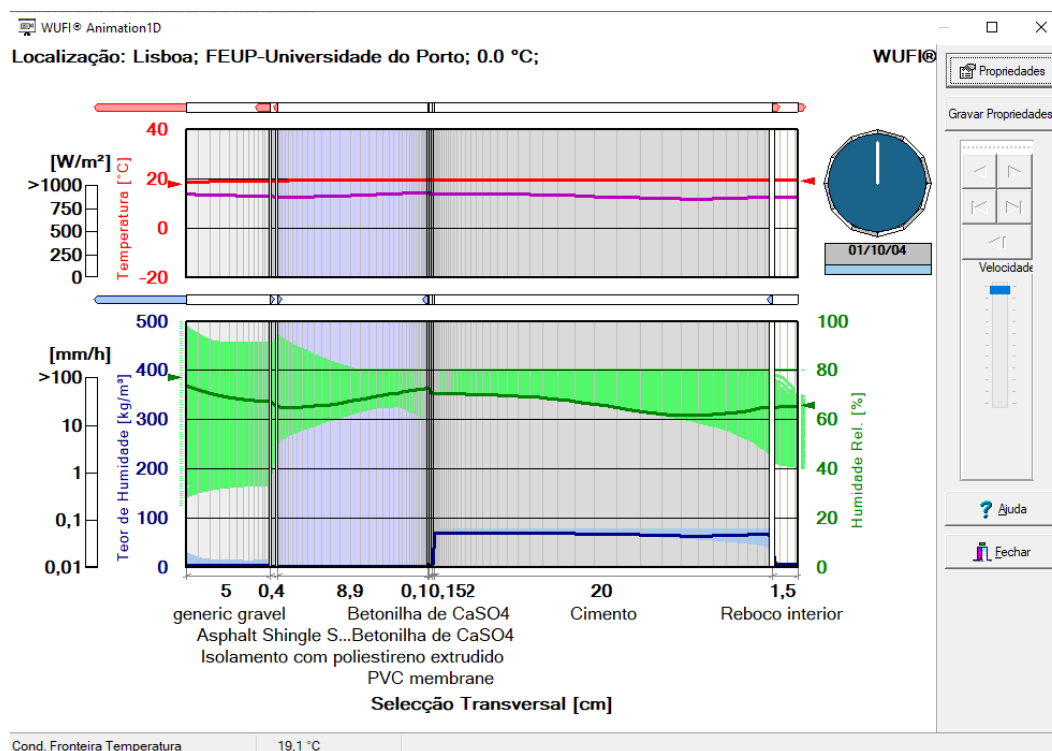


Fig. 5.33 - Filme da simulação da cobertura plana 2

#### 5.3.8.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 5.31 mostra-nos que ao longo do período de simulação, o teor de humidade total para esta cobertura vai reduzindo gradualmente, o que é positivo para o objetivo deste trabalho.

A Fig. 5.32 prova que os valores do teor de humidade total e por camadas tem valores bastante reduzidos, sendo de referir que o valor mínimo do teor de humidade é bastante próximo do valor final, o que leva a crer que a tendência futura seria a continuação da diminuição deste valor, que torna esta solução eficaz, no que à humidade diz respeito.

A observação do filme da simulação, revela que a humidade relativa nunca atingiu o valor máximo (100%), tornando assim, menos provável a ocorrência de condensações interiores e entre camadas

#### 5.3.9.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TERCEIRA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS

A Fig. 5.34 representa o gráfico do teor de humidade total da terceira solução construtiva:

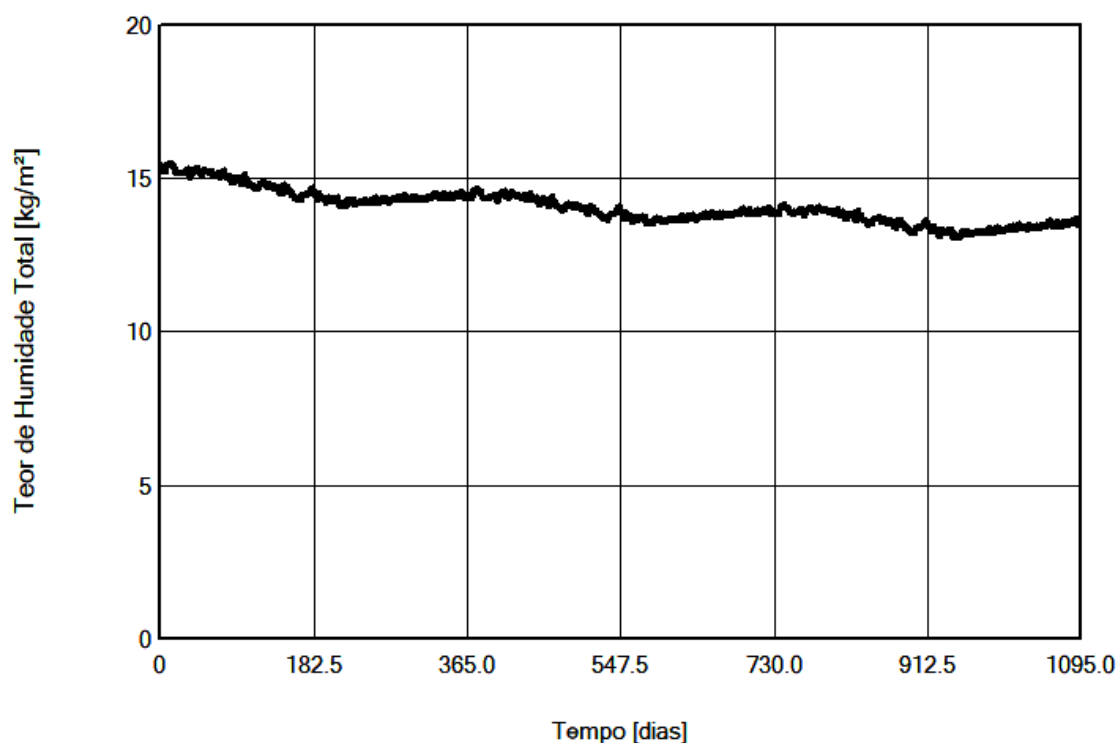


Fig. 5.34 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 3 durante o período de simulação

A Fig. 5.35 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,47	13,54	13,07	15,51

Teor de Humidade [kg/m <sup>3</sup> ]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
generic gravel	5,00	3,04	0,71	11,06
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada superior	7,30	5,07	2,94	9,81
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada inferior	5,90	4,17	2,30	7,07
XPS Placa de poliestireno extrudido (Conduct. ao	1,79	1,04	0,57	1,79
PVC membrane	0,00	0,00	0,00	0,00
Cimento, C35/45	75,00	66,19	64,58	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,19	3,04	6,30

Fig. 5.35 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 3

O filme da simulação da cobertura plana 3 encontra-se representado na Fig. 5.36:

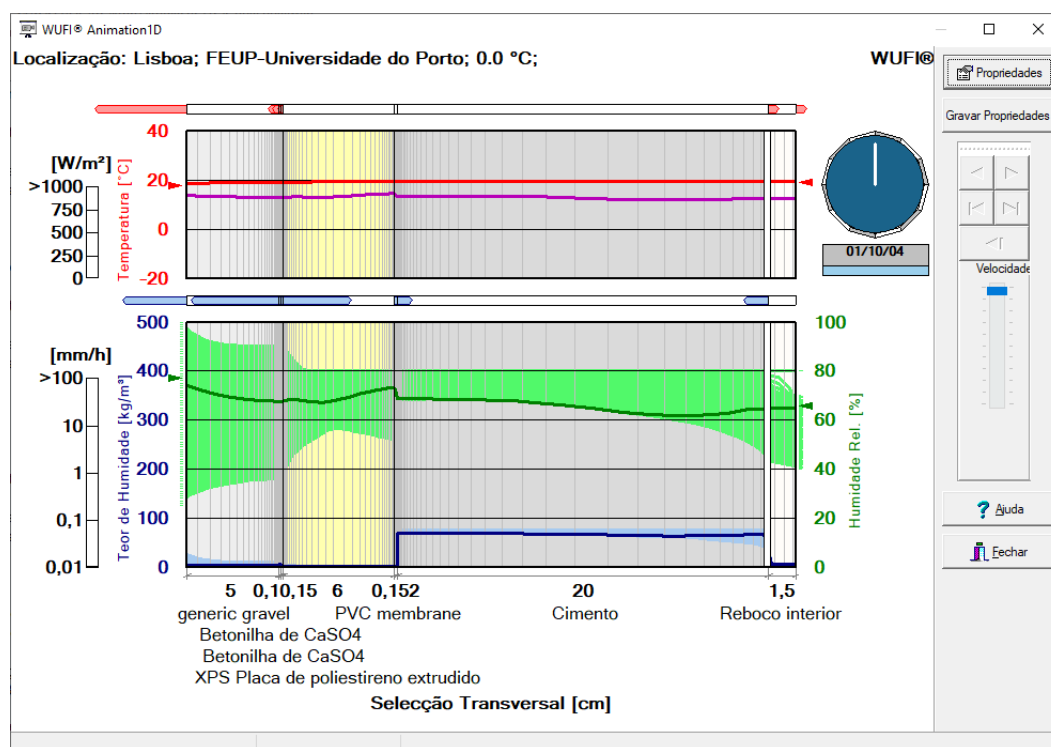


Fig. 5.36 - Filme da simulação da cobertura plana 3



#### 5.3.9.1.COMENTÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Tal como nas duas coberturas anteriores, a Fig. 5.34 mostra-nos que ao longo do período de simulação, o teor de humidade total para esta cobertura vai reduzindo gradualmente, o que é positivo para o objetivo deste trabalho.

A Fig. 5.35 prova que os valores do teor de humidade total e por camadas tem valores bastante reduzidos, sendo de referir que o valor mínimo do teor de humidade é bastante próximo do valor final, o que leva a crer que a tendência futura seria a continuação da diminuição deste valor, que torna esta solução eficaz, no que à humidade diz respeito.

A observação do filme da simulação, revela que a humidade relativa nunca atingiu o valor máximo (100%), tornando assim, menos provável a ocorrência de condensações interiores e entre camadas

#### 5.3.10.RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA QUARTA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA PARA COBERTURAS PLANAS

A Fig. 5.37 representa o gráfico do teor de humidade total da quarta solução construtiva:

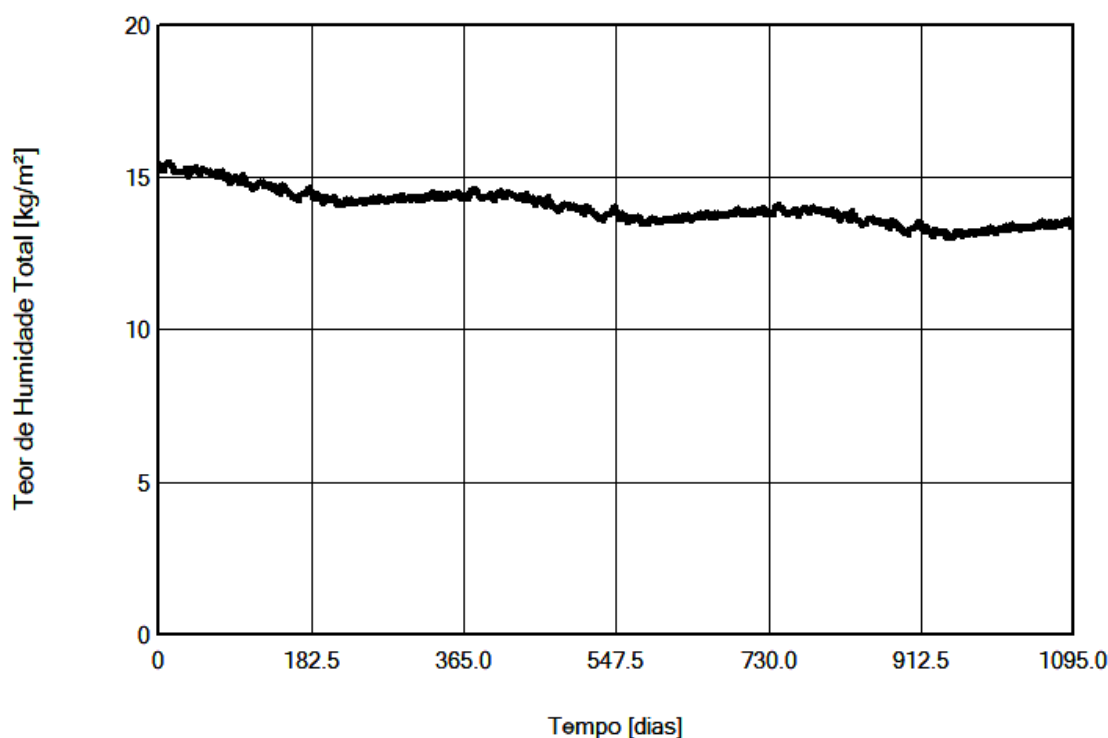


Fig. 5.37 - Gráfico do teor de humidade total da cobertura plana 4 durante o período de simulação

A Fig. 5.38 apresenta o valor inicial, final, mínimo e máximo do teor de humidade total e por camada, obtidos na simulação desta cobertura.

Teor de Humidade [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Início	Fim	Min.	Max.
Teor de Humidade Total	15,47	13,48	13,0	15,51

Teor de Humidade [kg/m <sup>3</sup> ]				
Camada/Material	Início	Fim	Min.	Max.
generic gravel	5,00	3,02	0,72	10,88
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada superior	7,30	5,07	2,95	9,87
Betonilha de CaSO <sub>4</sub> , camada inferior	5,90	4,17	2,30	7,08
XPS Placa de poliestireno extrudido (Conduct. ao	1,79	1,02	0,59	1,79
Asphalt Shingle System	0,00	0,00	0,00	0,00
Cimento, C35/45	75,00	65,89	64,25	75,00
Reboco interior (gesso)	6,30	5,19	3,04	6,30

Fig. 5.38 - Valor do teor de humidade total e por camada da cobertura plana 4

O filme da simulação da cobertura plana 4 encontra-se representando na Fig. 5.39:

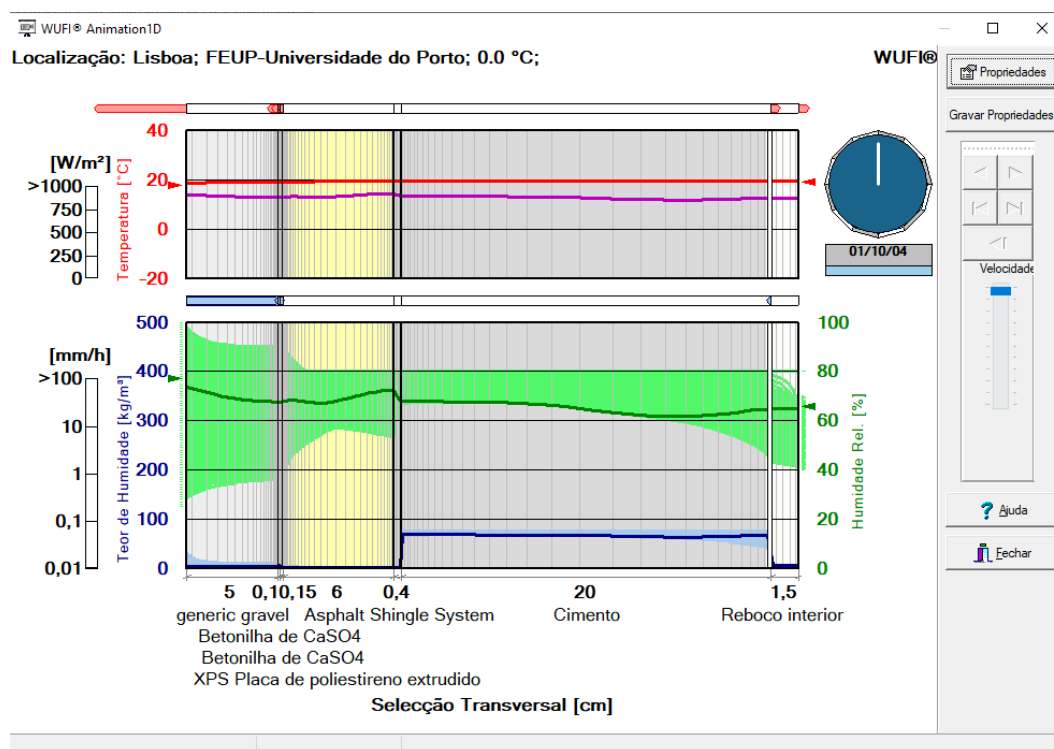


Fig. 5.39 - Filme da simulação da cobertura plana 4

#### **5.3.10.1.COMETÁRIO FINAL SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS**

Tal como nas duas coberturas anteriores, a Fig. 5.37 mostra-nos que ao longo do período de simulação, o teor de humidade total para esta cobertura vai reduzindo gradualmente, o que é positivo para o objetivo deste trabalho.

A Fig. 5.38 prova que os valores do teor de humidade total e por camadas tem valores bastante reduzidos, sendo de referir que o valor mínimo do teor de humidade é bastante próximo do valor final, o que leva a crer que a tendência futura seria a continuação da diminuição deste valor, que torna esta solução eficaz, no que à humidade diz respeito.

A observação do filme da simulação, revela que a humidade relativa nunca atingiu o valor máximo (100%), tornando assim, menos provável a ocorrência de condensações interiores e entre camadas

No entanto, é de referir que de entre todas as coberturas planas, esta é a que aquela que apresenta o valor de teor de humidade final menor, sendo, teoricamente, a solução favorável no que toca ao comportamento à humidade.

#### **5.4.REFLEXÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS**

Após a análise individual dos resultados de cada simulação é possível retirar algumas conclusões sobre as mesmas. Em primeiro lugar, no que toca ao teor de humidade, tanto a cobertura inclinada como a cobertura plana, se bem construída, utilizando os materiais mais indicados, podem funcionar eficazmente. No entanto, é de registar que as coberturas planas, obtiveram melhores resultados, principalmente a cobertura plana invertida que se destaca de todas as restantes.

No que toca às coberturas inclinadas, é de realçar as coberturas 3 e 7, por serem aquelas que obtêm melhores resultados relativamente ao teor de humidade. Já as coberturas 4 e 5 foram aquelas em que os resultados não foram de todo satisfatórios, sendo estas, soluções construtivas a não utilizar.

Já nas coberturas planas, a que claramente atingiu os objetivos referentes aos valores do teor de humidade foi a cobertura 4 (cobertura invertida plana). A cobertura 1, das três analisadas, foi a que teve valores mais elevados, no entanto não se pode considerar que os resultados desta sejam maus, pelo contrário.

Apesar das coberturas planas terem atingido melhores resultados face as coberturas inclinadas, é de referir que as primeiras são de mais difícil execução em obra, pelo que se exige um extremo rigor na fase de projeto e execução das mesmas, para evitar futuras anomalias e patologias do edifício.



# 6

## APLICAÇÃO DA ACV ÀS COBERTURAS ANALISADAS

### 6.1. ENQUADRAMENTO

No presente capítulo, será implementada a Avaliação do Ciclo de Vida nas coberturas selecionadas para análise do seu comportamento em relação à humidade, com o objetivo de avaliar o impacto ambiental de cada elemento construtivo, e também, identificar quais os materiais que podem causar mais impacto.

Como exposto nos capítulos anteriores, aspetos como o desenvolvimento sustentável bem como os seus fundamentos de concretização do equilíbrio social, económico e ambiental devem ter um papel primordial na indústria da construção.

Atualmente podem ser realizadas análises baseadas na abordagem do ciclo de vida, com vista a minimizar, ou reduzir, os impactos ambientais do setor, integrando questões relacionadas com as alterações climáticas e o esgotamento de recursos naturais durante a fase de projeto de construções novas, tendo por base a lógica de *Cradle-to-Gate*.

Fundamentada pelos pontos apresentados anteriormente, será realizada a análise de várias soluções construtivas de coberturas, sendo que existem umas mais correntemente utilizadas em Portugal do que outras. No entanto, como este é um trabalho académico, optou-se por estudar também aquelas que são menos frequentes no nosso país.

### 6.2. METODOLOGIA DE ACV NA ANÁLISE GERAL DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE COBERTURAS

#### 6.2.1. NOÇÕES INICIAIS

A metodologia em questão utiliza a Avaliação do Ciclo de Vida como ferramenta de avaliação ambiental. Numa fase inicial são estipuladas as soluções construtivas a utilizar bem como os materiais que estas utilizam, e determinado um conjunto de requisitos estruturais e funcionais do sistema que estarão na base da definição dos constrangimentos e limitações, e na definição de parâmetros de projeto mínimos. (Gouveia, 2015)

Por fim, é realizada a ACV com o objetivo de minimizar os impactos ambientais na escolha de materiais de construção utilizados.

## 6.2.2. MODELO DE ACV E DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS ANALISADOS

## 6.2.2.1. CONSIDERAÇÕES

Para a análise do ciclo de vida de soluções construtivas de coberturas, utilizadas neste trabalho, é utilizada uma perspetiva *Cradle-to-Gate*, e é assente na metodologia recomendada nos fundamentos e bases de dados publicados por Mateus. (*Avaliação do ciclo de vida\_R\_Mateus\_Luís\_Bragança0002.pdf*, [s.d.])

Esta análise cinge-se principalmente ao entendimento do impacto de cada solução construtiva nas diferentes categorias de impacto ambiental, de acordo com a seleção de materiais e técnicas construtivas correntemente utilizada, quer para coberturas inclinadas quer para planas.

## 6.2.3. TRATAMENTO DE DADOS

Para chegar a um resultado preciso, e ser exequível trabalhar com várias unidades diferentes, será necessário adotar uma unidade, de forma a que todos os valores respeitem os mesmos critérios, considerando:

- Materiais de construção: 1Kg
- Soluções construtivas: 1m<sup>2</sup> de área

## 6.2.4. MATERIAIS UTILIZADOS

No documento “Avaliação do ciclo de vida de edifícios – Impacte ambiental de soluções construtivas” de Luís Bragança e Ricardo Mateus é possível encontrar várias soluções construtivas para coberturas. No entanto, neste trabalho foram algumas coberturas diferentes das que constam no documento supramencionado. Ainda assim, é possível estimar os valores das diferentes categorias de impacto ambiental, através da base de dados de materiais de construções.

Do Quadro 6.1 ao Quadro 6.6 são apresentados os materiais utilizados em cada cobertura analisada, para, assim, quantificar as categorias de impactos ambientais associadas a estes.

Material			
Cobertura inclinada 1 (1_CI_PVC_XPS) e (1_CI_PVC_XPS_PV- POLI)	Cobertura inclinada 2 (2_CI_FB_XPS_PV)	Cobertura inclinada 3 (3_CI_FB_LA), (3_CI_FB_LA_PV)	Cobertura inclinada 4 (4_CI_CE_LA), (4_CI_CE_LA_PV)
Telhado em PVC	Painel de fibrocimento	Painel de fibrocimento	Telha cerâmica (barro)
Camada de ar 30 mm	Camada de ar 30 mm	Camada de ar 30 mm	Camada de ar 30 mm
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	Placa de poliestireno extrudido, XPS	Lã Mineral	Lã Mineral

Barreira pára-vapor em polietileno	-	Barreira pára-vapor em polietileno	Barreira pára-vapor em polietileno
Betão Armado	Betão Armado	Betão Armado	Betão Armado
Gesso Cartonado	Gesso Cartonado	Gesso Cartonado	Gesso Cartonado

Quadro 6.1 - Materiais Utilizados nas coberturas inclinadas 1, 2, 3 e 4

Cobertura incl.5 (5_CI_MZ_PU_PV<)	Cobertura incl.6 (6_CI_MZ_PU_PV>)
Telha metálica	Telha metálica
Camada de ar de 30 mm	Camada de ar de 30 mm
Espuma pulverizada de poliuretano	Espuma pulverizada de poliuretano
Barreira pára-vapor em polietileno	Membrana Asfáltica (asphalt shingle system)
Betão armado	Betão armado
Gesso Cartonado	Gesso Cartonado

Quadro 6.2 - Materiais Utilizados nas coberturas inclinadas 5 e 6

Material
<i>Generic gravel</i> (godo)
Membrana em PVC flexível
Poliestireno extrudido, XPS
Betonilha CaSO <sub>4</sub>
Barreira pára-vapor à base de polietileno
Betão armado
Gesso cartonado

Quadro 6.3 - Materiais Utilizados nas coberturas planas 1

Material
<i>Generic gravel</i> (godo)
Membrana asfáltica ( <i>Asphalt Shingle System</i> )
Poliestireno extrudido, XPS
Betonilha CaSO <sub>4</sub>
Membrana em PVC flexível

Betão armado
Gesso cartonado

Quadro 6.4 - Materiais utilizados na cobertura plana 2

Material
<i>Generic gravel</i> (godo)
Betonilha CaSO <sub>4</sub>
Poliestireno extrudido, XPS
Membrana em PVC flexível
Betão armado
Gesso cartonado

Quadro 6.5 - Materiais utilizados na cobertura plana 3

Material
Brita granítica
Betonilha CaSO <sub>4</sub>
Poliestireno extrudido, XPS
Membrana asfáltica ( <i>Asphalt Shingle System</i> )
Betão armado
Gesso cartonado

Quadro 6.6 - Materiais utilizados na cobertura plana 4

#### 6.2.4.1. PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS

Para ser exequível a aplicação do método ACV, é fundamental que haja uma conversão dos valores das massas dos materiais utilizados, visto que os valores das categorias de impacto ambiental encontram-se expressos em Kg de material e no processo de cálculo estas categorias apresentam-se em m<sup>2</sup> de elemento construtivo. Para se efetuar esta conversão, é preciso conhecer as propriedades dos materiais utilizados. (*LNEC\_ITE\_50.pdf*, [s.d.])

De referir que independentemente da cobertura em que um dado material foi aplicado, a espessura do mesmo não varia, sendo esta variável dependente exclusivamente do material em si e não da solução construtiva em que foi empregue.

O Quadro 6.7 apresenta os valores das propriedades dos materiais utilizados em todas as coberturas em estudo.



Material	Condutibilidade térmica ( $\lambda$ )	Massa volúmica aparente seca ( $\rho$ )	Espessura	Massa por m <sup>2</sup> de cobertura
	[W/(m.K)]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m]	[Kg/m <sup>2</sup> ]
Telhado em PVC	0,2	1300	0,005	6,5
Painel fibrocimento	0,95	1900	0,013	24,7
Telha cerâmica (barro)	0,288	1300	0,013	16,9
Telha metálica (zinco)	46	7800	0,013	101,4
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-
Camada de ar 60 mm	-	-	-	-
Placa de poliestireno extrudido, XPS	0,03	40	0,06	2,4
Lã Mineral	0,04	60	0,08	4,8
Betão armado	1,6	2220	0,2	444
Gesso Cartonado	0,2	850	0,015	12,75
Espuma pulverizada de poliuretano	0,025	39	0,089	3,471
Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	1,6	1960	0,001	1,96
Membrana em PVC flexível	0,2	1500	0,00152	2,28
<i>Asphalt Shingle System</i>	0,2	1500	0,004	6
<i>Generic gravel (godo)</i>	0,7	1400	0,05	70
Barreira pára-vapor à base de polietileno	2,3	130	0,01	1,3

Quadro 6.7 - Propriedades dos materiais utilizados nas coberturas estudadas

## 6.2.4.2. QUANTIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTES AMBIENTAIS DOS MATERIAIS

Os valores apresentados no Quadro 6.8 seguinte, representam os impactos *cradle-to-gate* associados à produção de 1 Kg de material, e foram retirados da base de dado ACV.

Depois, conhecendo a espessura dos materiais utilizados, usamos como referencia 1 m<sup>2</sup> de material, e assim, é possível fazer uma conversão dos valores das categorias do impacto ambiental, multiplicado os

valores das massas por m<sup>2</sup> de cobertura pelos valores das categorias de impacto ambiental apresentados no Quadro 6.8.

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
Telhado em PVC	2,26E-02	1,97E+0	2,84E-09	5,35E-03	3,12E-04	7,59E-04	4,69E+01	9,34E-01
Painel fibrocimento	7,19E-03	1,03E+00	1,30E-07	2,22E-03	1,56E-04	1,87E-04	1,33E+01	0,00E+00
Telha cerâmica (barro)	6,58E-03	8,16E-01	8,41E-08	2,90E-03	1,55E-04	2,85E-04	1,46E+01	7,41E-01
Telha metálica (zinco)	1,75E-02	2,46E00	1,37E-07	4,02E-02	1,44E-03	2,41E-03	2,84E+01	5,60E-01
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Camada de ar 60 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	4,09E-02	9,60E+0	1,64E-04	1,53E-02	8,48E-04	1,19E-03	9,24E+01	1,02E+00
Lã Mineral	1,05E-02	1,46E+0	6,10E-08	8,32E-03	9,28E-04	4,46E-04	2,16E+01	9,79E-01
Betão armado	6,08E-04	1,48E-01	3,55E-09	5,56E-04	5,28E-05	5,76E-05	1,24E+00	7,39E-03
Gesso Cartonado	2,48E-03	3,50E-01	3,89E-08	1,09E-03	4,69E-05	1,73E-04	5,74E+00	3,21E-01
Painel em poliuretano	4,31E-02	4,26E+0	1,89E-08	1,77E-02	2,05E-03	2,75E-03	1,00E+02	2,57E+00

Betonilha de CaSO <sub>4</sub>	2,38E-04	1,10E-01	3,55E-09	1,79E-04	6,49E-06	2,84E-05	5,56E-01	6,24E-03
Membrana em PVC flexível	2,26E-02	1,97E+0	2,84E-09	5,35E-03	3,12E-04	7,59E-04	4,69E+01	9,34E-01
Asphalt Shingle System	2,35E-02	5,81E-01	7,27E-07	1,94E-03	1,98E-04	3,02E-04	5,33E+01	9,73E-02
Generic gravel (godo)	1,81E-03	2,63E-01	3,43E-08	1,56E-03	4,66E-05	3,13E-04	7,58E-00	8,35E-01
Barreira pára-vapor em polietileno	4,03E-02	1,14E+00	0E00	1,69E-02	4,57E-04	1,63E-03	6,80E+01	0E00
Borracha	3,88E-02	3,16E00	3,09E-09	1,03E-02	6,76E-04	7,64E-04	8,53E+01	5,40E-01

Quadro 6.8 - Impactes associados à produção de 1Kg de material

Seguidamente, são apresentados os valores das categorias de impacto ambiental das coberturas inclinadas e planas, que se pode observar do Quadro 6.9 ao Quadro 6.18

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP (Kg Sb)	GWP (Kg CO <sub>2</sub> )	ODP (Kg CFC-11)	AP (Kg SO <sub>2</sub> )	POCP (Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	EP (KgPO <sub>4</sub> )	ENR (MJ)	ER (MJ)
Telhado em PVC	1,47E-01	1,28E+01	1,85E-08	3,48E-02	2,03E-03	4,93E-03	3,05E+02	6,07E+00
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+01	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+02	2,45E+00

Barreira para-vapor em polietileno	5,24E-03	1,48E-01	0,00E+0 0	2,20E-03	5,94E- 05	2,12E-04	8,84E+00	0,00E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E- 02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E- 04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>5,52E-01</b>	<b>1,06E+0 2</b>	<b>3,96E-04</b>	<b>3,34E-01</b>	<b>2,82E- 02</b>	<b>3,58E-02</b>	<b>1,16E+03</b>	<b>1,59E+01</b>

Quadro 6.9 - Quantificação das categorias de impacto ambiental da cobertura inclinada 1

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC- 11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
Painel fibrociment o	9,35E-02	1,34E+0 1	1,69E-06	2,89E-02	2,03E-03	2,43E-03	1,73E+02	0,00E+0 0
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Placa de poliestiren o extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+0 1	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+02	2,45E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>4,93E-01</b>	<b>1,07E+0 2</b>	<b>3,97E-04</b>	<b>3,26E-01</b>	<b>2,81E-02</b>	<b>3,31E-02</b>	<b>1,02E+03</b>	<b>9,82E+00</b>

Quadro 6.10 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 2

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
Painel fibrocimentoso	9,35E-02	1,34E+01	1,69E-06	2,89E-02	2,03E-03	2,43E-03	1,73E+02	0,00E+00
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã Mineral	5,04E-02	7,01E+00	2,93E-07	3,99E-02	4,45E-03	2,14E-03	1,04E+02	4,70E+00
Barreira pára-vapor em polietileno	5,24E-03	1,48E-01	0,00E+00	2,20E-03	5,94E-05	2,12E-04	8,84E+00	0,00E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+01	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+00	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>4,51E-01</b>	<b>9,07E+01</b>	<b>4,05E-06</b>	<b>3,32E-01</b>	<b>3,06E-02</b>	<b>3,26E-02</b>	<b>9,09E+02</b>	<b>1,21E+01</b>

Quadro 6.11 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura inclinada 3

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
Telha cerâmica (barro)	1,11E-01	1,37E+01	1,41E-06	4,87E-02	2,60E-03	4,79E-03	2,45E+02	1,24E+01
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã Mineral	5,04E-02	7,01E+00	2,93E-07	3,99E-02	4,45E-03	2,14E-03	1,04E+02	4,70E+00

Barreira para-vapor em polietileno	5,24E-03	1,48E-01	0,00E+0 0	2,20E-03	5,94E- 05	2,12E-04	8,84E+00	0,00E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E- 02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E- 04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>4,68E-01</b>	<b>9,10E+0 1</b>	<b>3,78E-06</b>	<b>3,52E-01</b>	<b>3,12E- 02</b>	<b>3,49E-02</b>	<b>9,82E+02</b>	<b>2,45E+01</b>

Quadro 6.12 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 4

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC- 11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
Telha metálica (zinco)	2,96E-01	4,16E+0 1	2,32E-06	6,79E-01	2,43E-02	4,07E-02	4,80E+02	9,46E+00
Camada de ar 30 mm	-	-	-	-	-	-	-	-
Painel em poliuretano	1,50E-01	1,48E+0 1	6,56E-08	6,14E-02	7,12E- 03	9,55E-03	3,47E+02	8,92E+00
Barreira para-vapor em polietileno	5,24E-03	1,48E-01	0,00E+0 0	2,20E-03	5,94E- 05	2,12E-04	8,84E+00	0,00E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E- 02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E- 04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>7,52E-01</b>	<b>1,27E+0 2</b>	<b>4,45E-06</b>	<b>1,00E+0 0</b>	<b>5,56E- 02</b>	<b>7,83E-02</b>	<b>9,12E+02</b>	<b>2,58E+01</b>

Quadro 6.13 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 5

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP (Kg Sb)	GWP (Kg CO <sub>2</sub> )	ODP (Kg CFC-11)	AP (Kg SO <sub>2</sub> )	POCP (Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	EP (KgPO <sub>4</sub> )	ENR (MJ)	ER (MJ)
Telha metálica (zinco)	2,96E-01	4,16E+0 <sub>1</sub>	2,32E-06	6,79E-01	2,43E-02	4,07E-02	4,80E+02	9,46E+0 <sub>0</sub>
Camada de ar 30 mm								
Painel em poliuretano	1,50E-01	1,48E+0 <sub>1</sub>	6,56E-08	6,14E-02	7,12E-03	9,55E-03	3,47E+02	8,92E+00
<i>Asphalt Shingle System</i>	1,41E-01	3,49E+0 <sub>0</sub>	4,36E-06	1,16E-02	1,19E-03	1,81E-03	3,20E+02	5,84E-01
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 <sub>1</sub>	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 <sub>0</sub>	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>8,88E-01</b>	<b>1,30E+0<sub>2</sub></b>	<b>8,82E-06</b>	<b>1,01E+0<sub>0</sub></b>	<b>5,67E-02</b>	<b>7,99E-02</b>	<b>1,22E+03</b>	<b>2,63E+01</b>

Quadro 6.14 - Quantificação das categorias de impacto ambiental na cobertura inclinada 6

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP (Kg Sb)	GWP (Kg CO <sub>2</sub> )	ODP (Kg CFC-11)	AP (Kg SO <sub>2</sub> )	POCP (Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	EP (KgPO <sub>4</sub> )	ENR (MJ)	ER (MJ)
<i>Generic gravel (godo)</i>	1,27E-01	1,84E+0 <sub>1</sub>	2,40E-06	1,09E-01	3,26E-03	2,19E-02	5,31E+0 <sub>2</sub>	5,85E+01
Membrana em PVC flexível	4,07E-02	3,55E+0 <sub>0</sub>	5,11E-09	9,63E-03	5,62E-04	1,37E-03	8,44E+0 <sub>1</sub>	1,68E+00
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+0 <sub>1</sub>	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+0 <sub>2</sub>	2,45E+00

Betonilha CaSO <sub>4</sub>	4,66E-04	2,16E-01	6,96E-09	3,51E-04	1,27E-05	5,57E-05	1,09E+0 0	1,22E-02
Barreira para-vapor em polietileno	5,24E-03	1,48E-01	0,00E+0 0	2,20E-03	5,94E-05	2,12E-04	8,84E+0 0	0,00E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+0 2	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+0 1	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>5,73E-01</b>	<b>1,16E+0 2</b>	<b>3,98E-04</b>	<b>4,19E-01</b>	<b>3,00E-02</b>	<b>5,42E-02</b>	<b>1,47E+0 3</b>	<b>7,00E+01</b>

Quadro 6.15 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 1

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
<i>Generic gravel (godo)</i>	1,27E-01	1,84E+0 1	2,40E-06	1,09E-01	3,26E-03	2,19E-02	5,31E+02	5,85E+0 1
<i>Asphalt Shingle System</i>	1,41E-01	3,49E+0 0	4,36E-06	1,16E-02	1,19E-03	1,81E-03	3,20E+02	5,84E-01
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+0 1	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+02	2,45E+0 0
Betonilha CaSO <sub>4</sub>	4,66E-04	2,16E-01	6,96E-09	3,51E-04	1,27E-05	5,57E-05	1,09E+00	1,22E-02
Membrana em PVC flexível	4,07E-02	3,55E+0 0	5,11E-09	9,63E-03	5,62E-04	1,37E-03	8,44E+01	1,68E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+0 1	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+0 0	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00



<b>Impacte ambiental total</b>	<b>7,08E-01</b>	<b>1,19E+02</b>	<b>4,02E-04</b>	<b>4,28E-01</b>	<b>3,11E-02</b>	<b>5,58E-02</b>	<b>1,78E+03</b>	<b>7,05E+01</b>
--------------------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Quadro 6.16 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 2

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
<i>Generic gravel</i> (godo)	1,27E-01	1,84E+01	2,40E-06	1,09E-01	3,26E-03	2,19E-02	5,31E+02	5,85E+01
Betonilha CaSO <sub>4</sub>	4,66E-04	2,16E-01	6,96E-09	3,51E-04	1,27E-05	5,57E-05	1,09E+00	1,22E-02
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+01	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+02	2,45E+00
Membrana em PVC flexível	4,07E-02	3,55E+00	5,11E-09	9,63E-03	5,62E-04	1,37E-03	8,44E+01	1,68E+00
Betão armado	2,70E-01	6,57E+01	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+00	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>5,67E-01</b>	<b>1,15E+02</b>	<b>3,98E-04</b>	<b>4,16E-01</b>	<b>2,99E-02</b>	<b>5,39E-02</b>	<b>1,46E+03</b>	<b>7,00E+01</b>

Quadro 6.17 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 3

Materiais	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	(Kg Sb)	(Kg CO <sub>2</sub> )	(Kg CFC-11)	(Kg SO <sub>2</sub> )	(Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	(KgPO <sub>4</sub> )	(MJ)	(MJ)
<i>Generic gravel</i> (godo)	1,27E-01	1,84E+01	2,40E-06	1,09E-01	3,26E-03	2,19E-02	5,31E+02	5,85E+01

Betonilha CaSO <sub>4</sub>	4,66E-04	2,16E-01	6,96E-09	3,51E-04	1,27E-05	5,57E-05	1,09E+00	1,22E-02
Placa de poliestireno extrudido (XPS)	9,82E-02	2,30E+01	3,94E-04	3,67E-02	2,04E-03	2,86E-03	2,22E+02	2,45E+00
<i>Asphalt Shingle System</i>	1,41E-01	3,49E+00	4,36E-06	1,16E-02	1,19E-03	1,81E-03	3,20E+02	5,84E-01
Betão armado	2,70E-01	6,57E+01	1,58E-06	2,47E-01	2,34E-02	2,56E-02	5,51E+02	3,28E+00
Gesso cartonado	3,16E-02	4,46E+00	4,96E-07	1,39E-02	5,98E-04	2,21E-03	7,32E+01	4,09E+00
<b>Impacte ambiental total</b>	<b>6,68E-01</b>	<b>1,15E+02</b>	<b>4,02E-04</b>	<b>4,19E-01</b>	<b>3,05E-02</b>	<b>5,44E-02</b>	<b>1,70E+03</b>	<b>6,89E+01</b>

Quadro 6.18 - Quantificação das categorias de impacte ambiental na cobertura plana 4

Assim, podemos agrupar, numa tabela o impacte ambiental de todas as coberturas, segundo cada indicador, como no Quadro 6.19 seguinte:

Tipo de cobertura	Categorias de Impacte Ambiental de LCA						Energia Incorporada	
	ADP (Kg Sb)	GWP (Kg CO <sub>2</sub> )	ODP (Kg CFC-11)	AP (Kg SO <sub>2</sub> )	POCP (Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	EP (KgPO <sub>4</sub> )	ENR (MJ)	ER (MJ)
Cobertura inclinada 1	5,52E-01	1,06E+02	3,96E-04	3,34E-01	2,82E-02	3,58E-02	1,16E+03	1,59E+01
Cobertura inclinada 2	4,93E-01	1,07E+02	3,97E-04	3,26E-01	2,81E-02	3,31E-02	1,02E+03	9,82E+00
Cobertura inclinada 3	4,51E-01	9,07E+01	4,05E-06	3,32E-01	3,06E-02	3,26E-02	9,09E+02	1,21E+01
Cobertura inclinada 4	4,68E-01	9,10E+01	3,78E-06	3,52E-01	3,12E-02	3,49E-02	9,82E+02	2,45E+01
Cobertura inclinada 5	7,52E-01	1,27E+02	4,45E-06	1,00E+00	5,56E-02	7,83E-02	9,12E+02	2,58E+01
Cobertura inclinada 6	8,88E-01	1,30E+02	8,82E-06	1,01E+00	5,67E-02	7,99E-02	1,22E+03	2,63E+01

Cobertura plana 1	5,73E-01	1,16E+0 2	3,98E-04	4,19E-01	3,00E-02	5,42E-02	1,47E+03	7,00E+01
Cobertura plana 2	7,08E-01	1,19E+0 2	4,02E-04	4,28E-01	3,11E-02	5,58E-02	1,78E+03	7,05E+01
Cobertura plana 3	5,67E-01	1,15E+0 2	3,98E-04	4,16E-01	2,99E-02	5,39E-02	1,46E+03	7,00E+01
Cobertura plana 4	6,68E-01	1,15E+0 2	4,02E-04	4,19E-01	3,05E-02	5,44E-02	1,70E+03	6,89E+01

Quadro 6.19 - Impactes totais de cada cobertura, segundo cada indicador

### 6.3.INTERPRETAÇÃO DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA CADA UMA DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS ESTUDADAS

Após a conclusão da quantificação das categorias de impactes ambientais referentes às coberturas selecionadas e estudadas neste trabalho, para ser possível fazer uma comparação e identificar as coberturas mais adequadas para utilização num edifício, no que à sustentabilidade diz respeito, será realizada uma comparação de todas as coberturas para cada categoria de impacto ambiental individual. Assim, no final, será possível obter aquela cobertura, que para todas as categorias avaliadas, terá menos impacto ambiental, sendo assim aquela em que a sua utilização é a mais favorável em futuras construções.

De referir que nos gráficos que serão apresentados de seguida, que as coberturas quer os materiais utilizados estão identificados com três cores, verde, amarelo e vermelho, significando um menor impacto, médio impacto e grande impacto, respetivamente.

#### 6.3.1. POTENCIAL DE DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP), EMPREGUE EM COBERTURAS

A primeira categoria de impacto ambiental analisada refere-se ao potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP), que se correlaciona com o esgotamento de recursos abióticos. A solução construtiva mais adequada será aquela que terá um valor associado a este impacto o mais baixo possível. Os valores para esta categoria associados às coberturas estudadas, estão apresentados na seguinte Fig. 6.1:

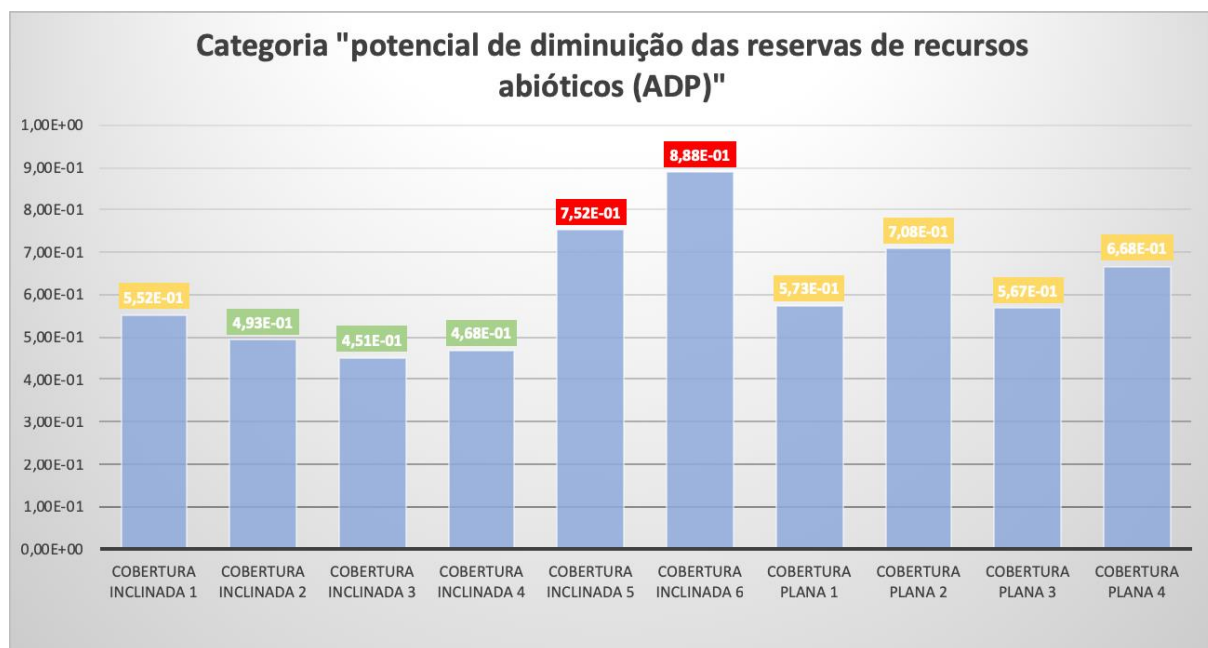


Fig. 6.1 - Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP) para todas as coberturas

Pela análise da Fig. 6.1, verifica-se que as coberturas inclinadas 2, 3 e 4, são aquelas em que a sua utilização é mais favorável no que à categoria ADP diz respeito. Já as coberturas inclinadas 5 e 6, com destaque para esta última, são aquelas em que apresentam um valor mais elevado, e assim, menos favoráveis. As restantes coberturas, apresentam valores intermédios, pelo que não se considera que a sua utilização seja deveras desadequada.

### 6.3.2. POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWP), EMPREGUE EM COBERTURAS

Esta categoria de impacto ambiental refere-se ao potencial de aquecimento global (GWP) que advém da utilização dos materiais constituintes de cada cobertura. A cobertura mais vantajosa, será aquela que apresente um menor valor para esta categoria, e, desta forma, a cobertura com mais impacto para o GWP será aquela que contenha o valor mais elevado.

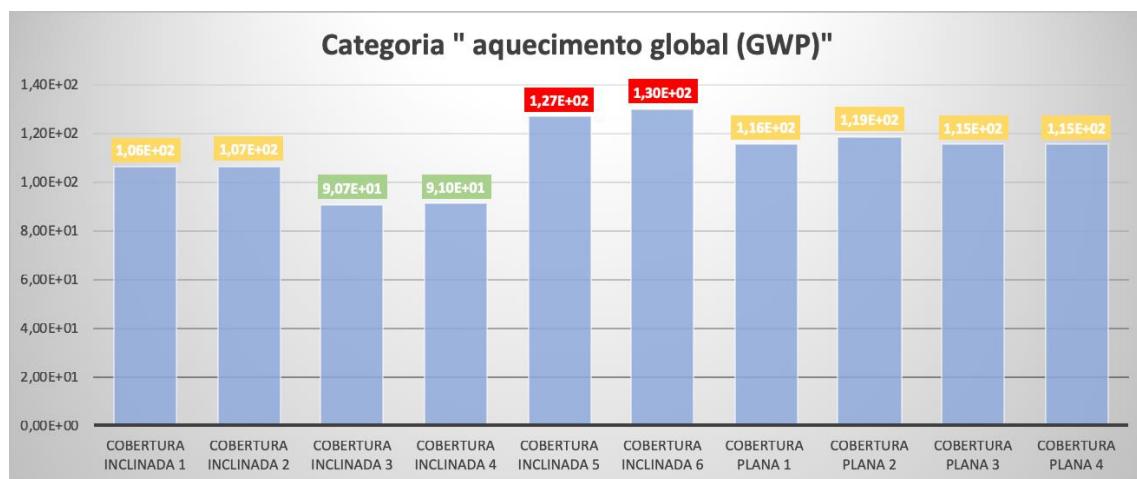


Fig. 6.2 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) para todas as coberturas

A Fig. 6.2 mostra que, para esta categoria em análise, a cobertura inclinada 3 bem como a cobertura inclinada 4, são as soluções mais adequadas uma vez que os seus valores, para este impacte, são os menores. Por sua vez, as coberturas inclinadas 5 e 6 são as menos adequadas dado que têm valores mais elevados para esta categoria.

#### 6.3.3. POTENCIAL DE DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE EM COBERTURAS

Esta categoria diz respeito ao potencial de destruição da camada do ozono (ODP). Como nas categorias abordadas anteriormente, a solução construtiva de coberturas mais adequada, no que a esta categoria diz respeito, será aquela que tenha o valor mais baixo. Já as coberturas que apresentem um valor mais elevado serão as menos adequadas.

Os valores de cada cobertura para a categoria ODP encontram-se apresentados na Fig. 6.3:



Fig. 6.3 - Potencial de destruição da camada do ozono (ODP)

Através da análise da Fig. 6.3, é possível comprovar que as coberturas inclinadas 3, 4, 5 e 6, são aquelas que, devido ao seu baixo valor para esta categoria são as mais adequadas. No entanto, de entre estas várias boas soluções, foi considerado que as coberturas inclinadas 3, 4 e 7 são as melhores. Por outro lado, as coberturas inclinadas 1, 2 e todas coberturas planas são aquelas que apresentam valores para a categoria tratada mais elevados, e por isso, são as soluções construtivas menos adequadas.

#### 6.3.4. POTENCIAL DE ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE EM COBERTURAS

Esta categoria refere-se ao potencial de acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP). Para este caso, uma cobertura será tanto mais adequada para utilização, quanto menor for o seu valor nesta categoria. Os valores de cada cobertura para esta categoria encontram-se na Fig. 6.4.

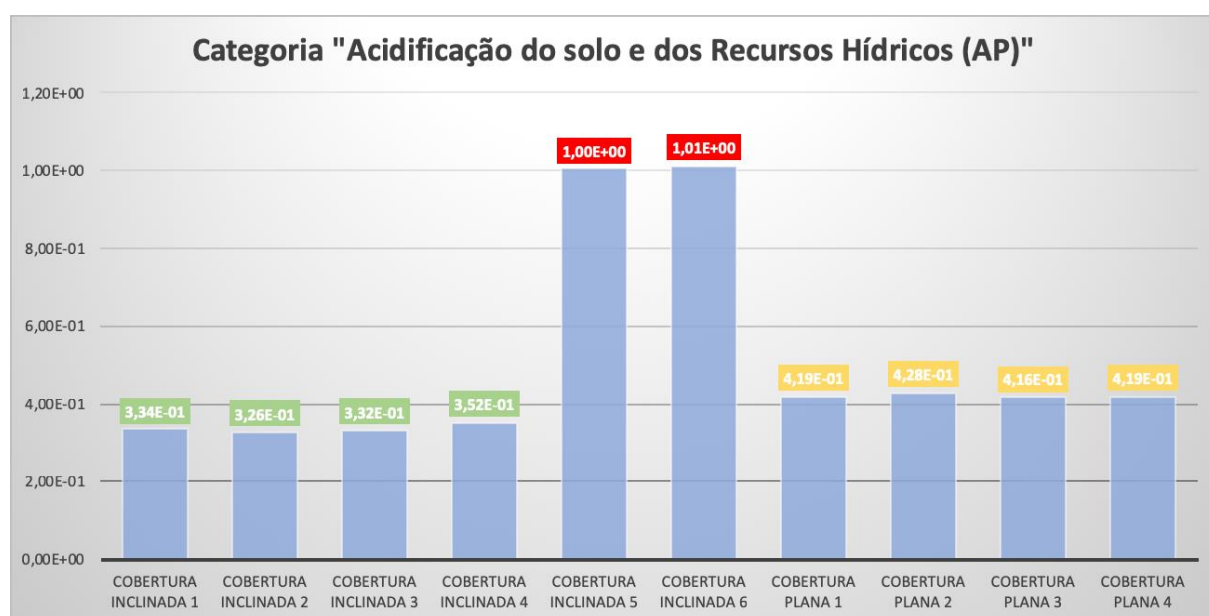


Fig. 6.4 - Potencial de acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP)

Pela observação da Fig. 6.4 é possível referir que, excetuando as coberturas inclinadas 5 e 6, todas contêm valores relativamente baixos e muito próximos uns dos outros, sendo que se pode considerar que são soluções adequadas no que à categoria AP diz respeito. No entanto, é de destacar as coberturas inclinadas 1, 2, 3 e 4, como sendo aquelas que, de entre todas, contêm os valores mais baixos. As coberturas inclinadas 5 e 6 tem valores bastante mais elevados, e, por isso, não se considera adequadas para utilização, segundo este indicador.

#### 6.3.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP), EMPREGUE EM COBERTURAS

Nesta categoria avalia-se o potencial de formação de ozono troposférico (POCP), e como nas categorias anteriores, quanto menor for o valor desta categoria de uma solução construtiva, mais adequada esta será para utilização num edifício, no que à categoria POCP diz respeito. Se, pelo contrário, o valor de

uma cobertura for elevado, então não será adequada por ter um forte impacto na formação de ozono troposférico.

A Fig. 6.5 apresenta os valores das dez coberturas referentes a esta categoria de impacto ambiental:

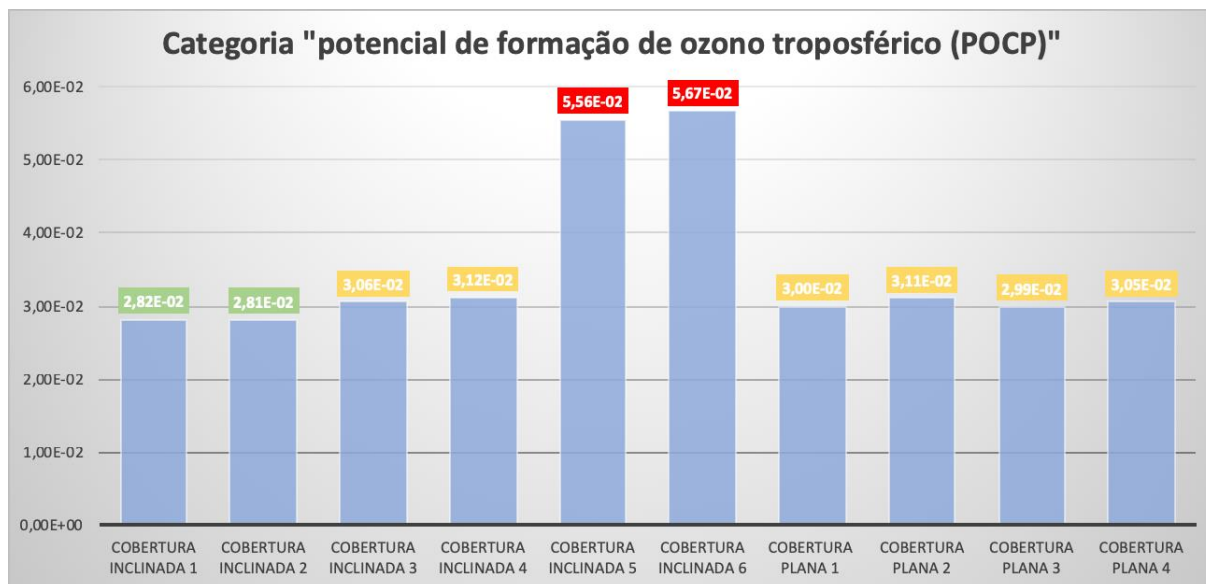


Fig. 6.5 - Potencial de formação de ozono troposférico (POCP)

Tal como na categoria anterior, a Fig. 6.5 revela uma grande uniformidade nos resultados desta categoria, com a exceção das coberturas inclinadas 5 e 6, que apresentam valores bastante elevados, considerando-se assim, soluções construtivas que não satisfazem os objetivos no que a esta categoria de impacto ambiental diz respeito. Em contrapartida, apesar dos resultados das restantes coberturas serem muito idênticos, destacam-se as coberturas inclinadas 1 e 2, por terem os valores da categoria POCP menores, sendo assim aquelas mais adequadas.

#### 6.3.6. CATEGORIA DE EUTROFIZAÇÃO (EP), EMPREGUE EM COBERTURAS

Esta categoria diz respeito ao potencial de eutrofização (EP) e está associado às emissões de azoto (N) e fósforo (P), resultando em fertilização excessiva dos ecossistemas. Quanto maior for o valor de uma cobertura para esta categoria, menos adequada esta solução construtiva será. Se por outro lado, o valor for baixo, então essa solução será adequada para este impacto.

A Fig. 6.6 apresenta os valores das dez coberturas referentes a esta categoria de impacto ambiental:

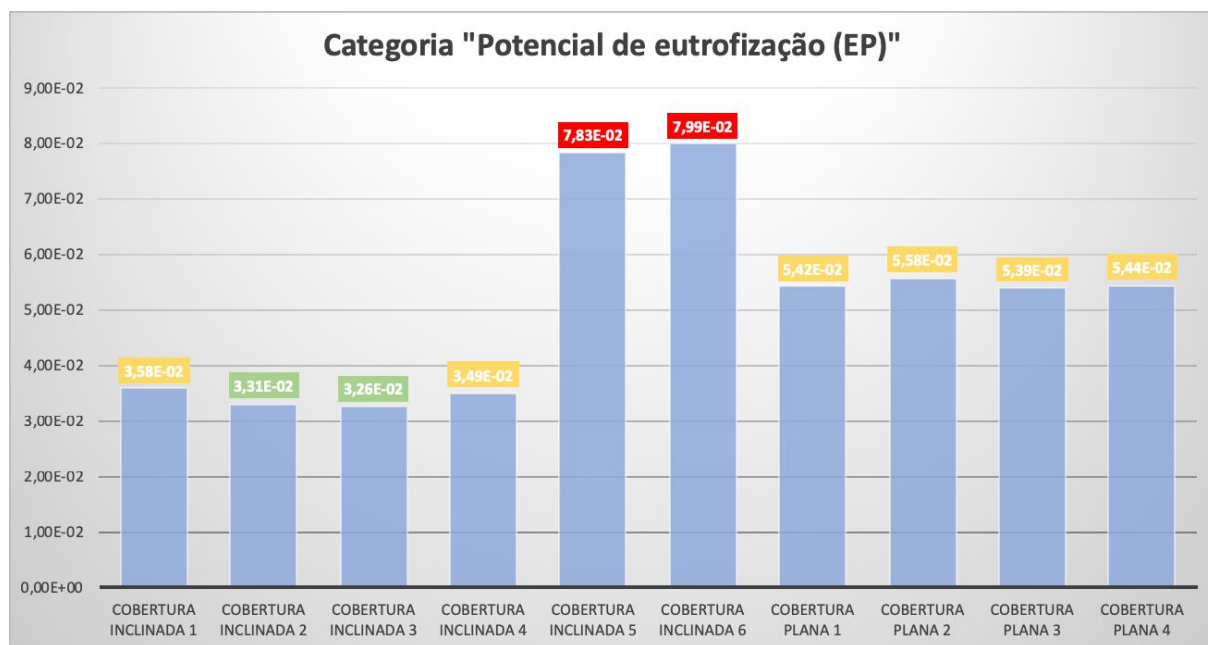


Fig. 6.6 - Potencial de eutrofização (EP)

A análise detalhada da Fig. 6.6, revela que, como em categorias anteriores, as coberturas inclinadas 5 e 6 são aquelas que surgem com valores mais elevados associados a esta categoria, e, assim, apresentam um pior desempenho para este impacto ambiental. Em contrapartida, as coberturas inclinadas 2 e 3 são aquelas que mostram um menor valor para o potencial de eutrofização, e portanto, uma melhor desempenho.

#### 6.3.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR), EMPREGUE EM COBERTURAS

Esta categoria refere-se ao potencial de energia não renovável incorporada (ENR), e está ligada à avaliação do contributo do ciclo de vida do produto para o esgotamento de recursos energéticos não renováveis, através de uma análise do consumo de energia não renovável, nuclear e fóssil. (Ana Novais, 2017)

Uma solução construtiva será mais adequada, quanto menor for o seu valor associado à categoria de impacto ambiental (ENR).

A Fig. 6.7 representa os resultados do IACV para a categoria ENR.



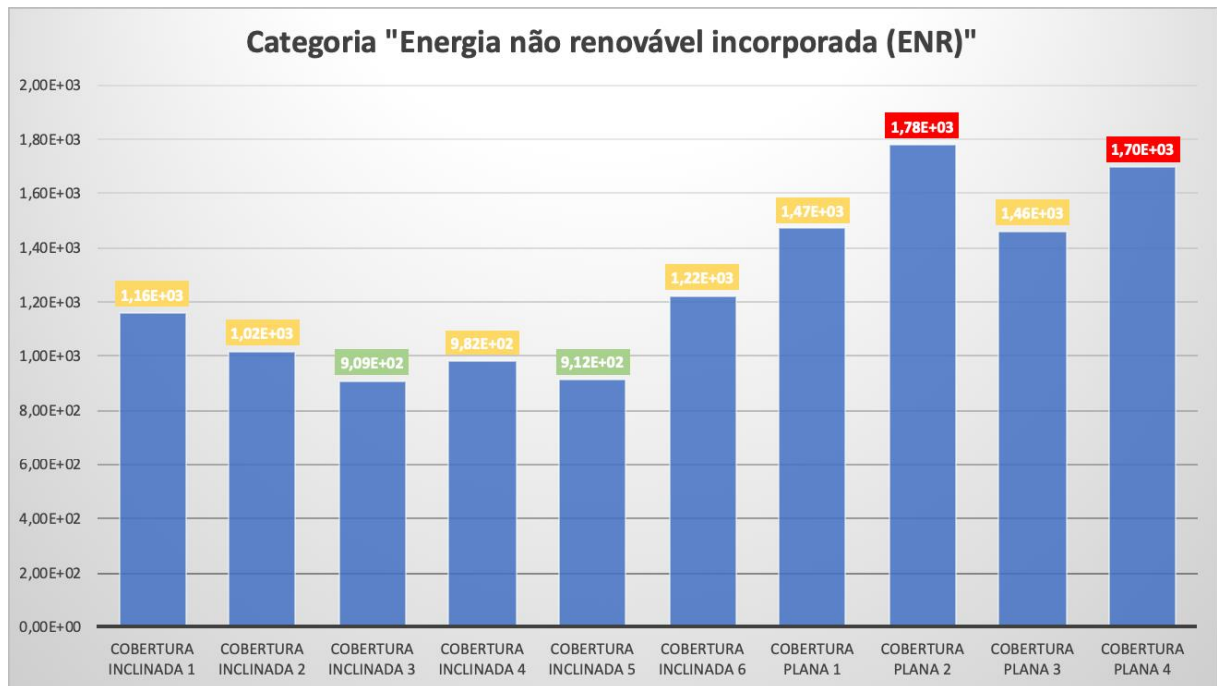


Fig. 6.7 - Categoria Energia não renovável incorporada (ENR)

O exame da Fig. 6.7 mostra que, a cobertura inclinada 3 e 5 são aquelas que causam menos impacto no que concerne à energia não renovável incorporada (ENR). No entanto, em geral, as coberturas planas e principalmente as coberturas planas 2 e 4, são aquelas menos adequadas para utilização no que respeita a esta categoria, visto serem aquelas que tem um maior valor associado a este impacto.

#### 6.3.8.CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE EM COBERTURAS

Nesta categoria, é avaliada a utilização de energia renovável invés de fontes não renováveis associados às fases do ciclo de vida do produto, sendo este um indicador com impacto ambiental positivo. Assim, e ao contrário das anteriores, uma solução que tenha um valor associado para esta categoria mais elevado, será aquela que menos impacto causa, sendo essa a mais adequada para utilização.

A Fig. 6.8 representa os resultados do IACV para o indicador ER.

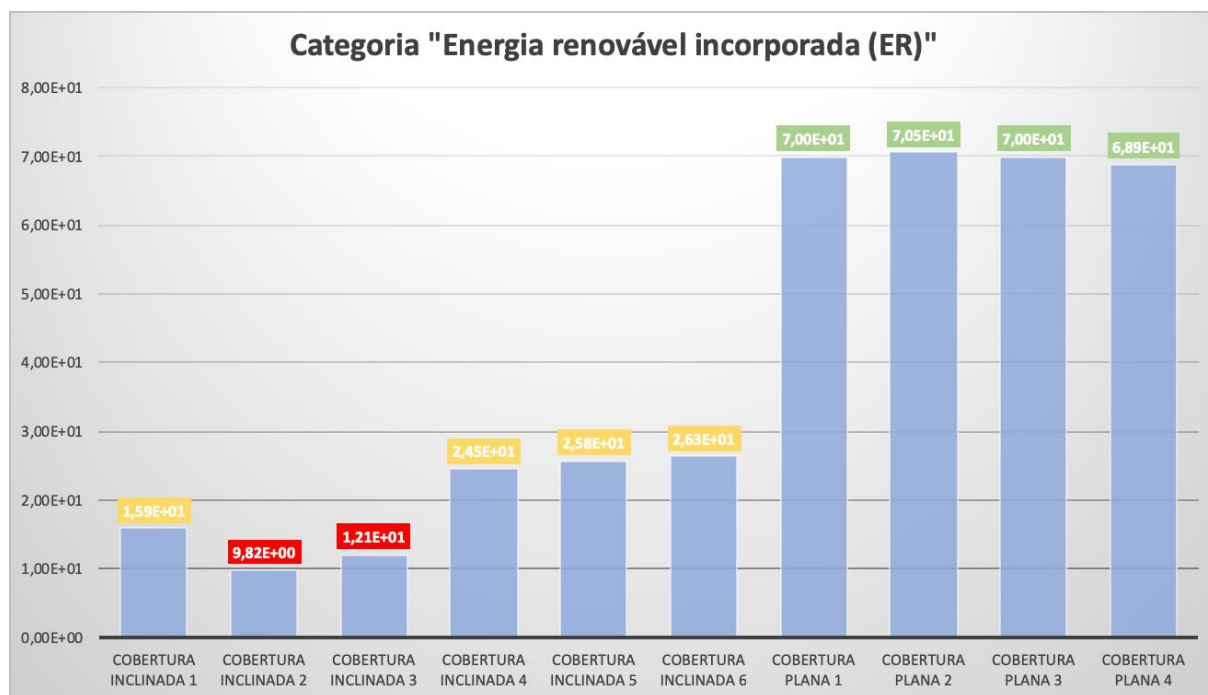


Fig. 6.8 - Categoria energia renovável incorporada (ER)

A interpretação da Fig. 6.8 revela que as coberturas planas, no geral, são aquelas que melhor respondem a este indicador, uma vez que são as que apresentam um valor associado a este maior. Assim, estas coberturas são as mais adequadas para utilização futura num edifício. Uma explicação para este resultado, prende-se com o facto de estas soluções construtivas utilizarem, no seu revestimento exterior, uma camada de godo, que nada mais é que um elemento extraído da natureza. Desta forma, o valor associado a esta categoria cresce exponencialmente nestas duas coberturas que utilizam este material.

No sentido oposto, as coberturas inclinadas 2 e 3, são aquelas que apresentam valores menores para este impacto, considerando-se assim as menos adequadas para utilização, para este caso.

#### 6.4. INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA CADA MATERIAL UTILIZADO

Após a análise e interpretação dos resultados referentes aos impactos ambientais provocados pelas dez coberturas utilizadas, é de extrema relevância proceder-se à análise dos impactos provocados individualmente por cada material. Assim, esta análise fornece informação adicional, que ajuda a entender melhor os resultados obtidos no subcapítulo anterior, uma vez que torna possível decifrar qual o material que pode estar a prejudicar ou a beneficiar o desempenho de uma cobertura no que aos impactos ambientais abordados diz respeito.

No entanto, há que ter em conta que os materiais utilizados nas coberturas diferem bastante em termos de quantidade utilizada, entre eles. Existem materiais com as mesmas funções, mas, no entanto, necessitam de “quantidades” (Kg/m<sup>2</sup>) diferentes para realizarem corretamente a sua função. Assim, torna-se fundamental fazer uma análise para todos os materiais, onde se utilizará para essa análise a mesma quantidade para todos, neste caso 1 Kg. Seguidamente realizava-se uma nova análise, todavia, nesta, tendo em conta os Kg/m<sup>2</sup> utilizados nas coberturas. Desta forma, com a primeira análise, é possível identificar, para o fabrico de 1Kg de todos os materiais, quais são os que contribuem com mais e menos impactos.

A segunda análise permite avaliar os impactos de todos os materiais quando utilizados nas coberturas analisadas neste trabalho (Kg/m<sup>2</sup>). Como foi dito anteriormente, independentemente da cobertura em causa, a quantidade (Kg/m<sup>2</sup>) de um certo material é igual para todas. Desta forma é possível fazer a segunda análise.

Para esta análise, agrupou-se todos os materiais utilizados e os seus valores associados aos indicadores das categorias de impactos ambientais, e foi realizada uma comparação individual de cada material para as oito categorias que Luís Bragança e Ricardo Mateus explicam. (*Avaliação do ciclo de vida\_R\_Mateus\_Luís\_Bragança0002.pdf*, [s.d.])

#### 6.4.1. CATEGORIA DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.9, é possível verificar os valores associados a categoria ADP para a quantidade de material, expresso em Kg/m<sup>2</sup>, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

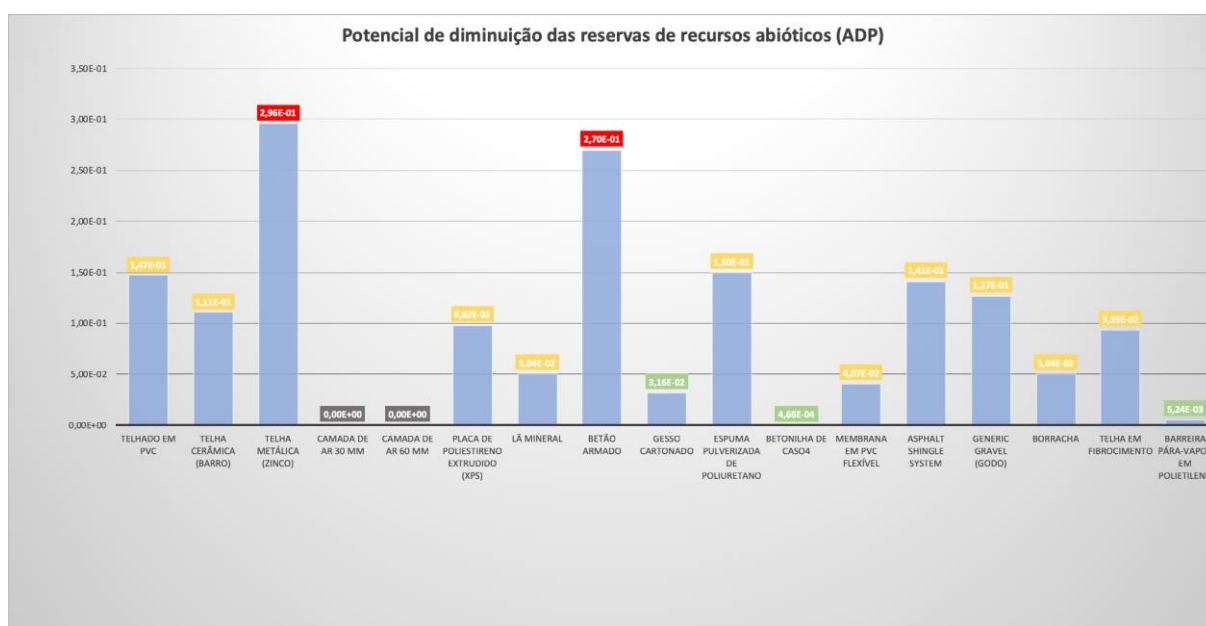


Fig. 6.9 - Categoria diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP), para Kg/m<sup>2</sup> de material

A Fig. 6.9 mostra que os materiais que menos impacto tem na categoria ADP são a betonilha de CaSO<sub>4</sub> e o gesso, dado que apresentam os valores mais baixos associados a este indicador. Por sua vez o betão armado e a telha metálica em zinco são aqueles em que os valores são os mais elevados, e, desta forma, são os mais prejudiciais para este caso. Assim se justifica o facto de as coberturas inclinadas 5 e 6 apresentarem valores para o ADP mais elevados, visto ambas utilizarem como revestimento exterior telha metálica em zinco.

É importante referir que quer a camada de ar de 30 mm quer a camada de ar de 60 mm não foi considerado visto não ser propriamente uma material, mas sim uma solução construtiva ou técnica

construtiva, sendo que apesar de influenciar o comportamento de uma cobertura ao nível do teor de humidade e de ACV, no entanto não seria justo a análise destas soluções como sendo materiais, porque não o são na realidade e aconteceria uma adulteração de resultados que não é de todo o objetivo deste trabalho.

#### 6.4.2. CATEGORIA CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.10, é possível verificar os valores associados a categoria GWP para a quantidade de material, expresso em Kg/m<sup>2</sup>, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

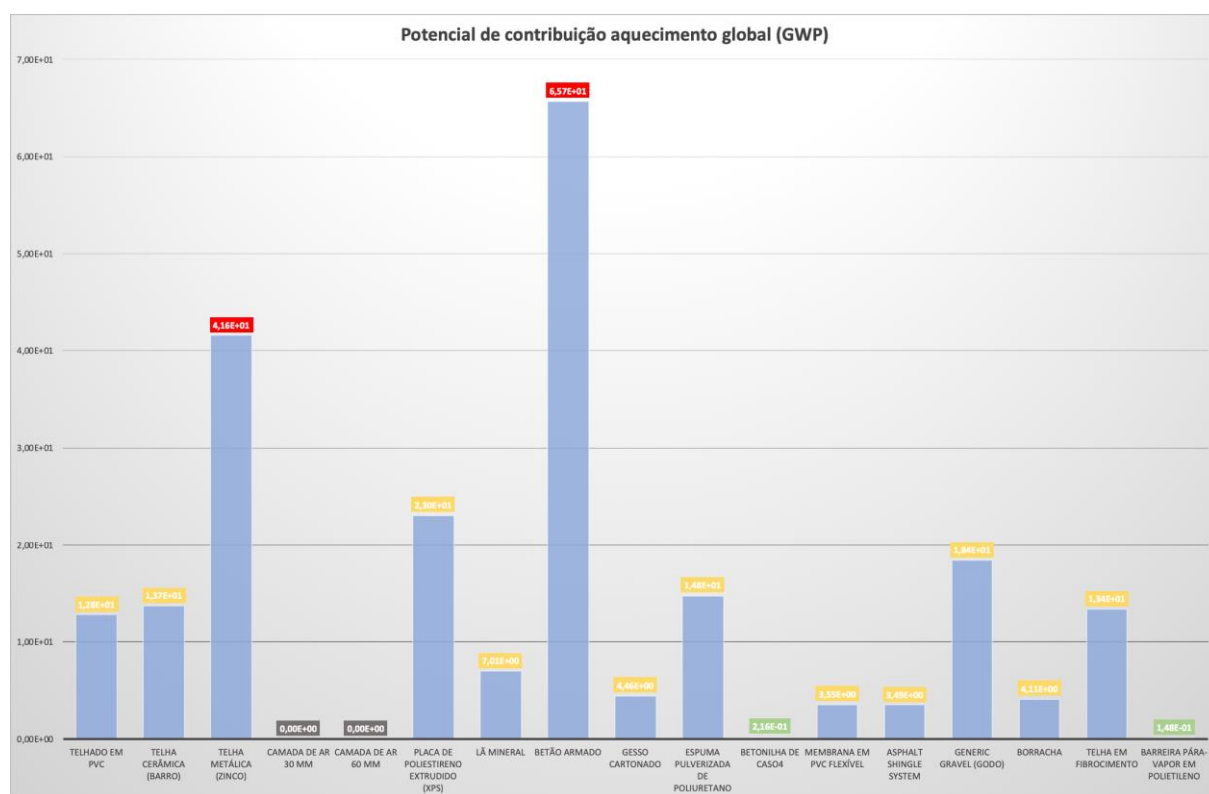


Fig. 6.10 - Categoria contribuição para o aquecimento global (GWP), para Kg/m<sup>2</sup> de material

A Fig. 6.10 é em tudo idêntica a figura anterior, visto que os materiais mais adequados para esta categoria são a betonilha de CaSO<sub>4</sub> e a barreira pára-vapor em polietileno, e os materiais piores são o betão armado e a telha metálica em zinco.

Como na categoria anterior, os materiais com valores mais elevados associados a estes indicadores contribuem notoriamente para o “mau comportamento” das coberturas onde foram empregues, como é o caso das coberturas inclinadas 5 e 6 que utilizam a chapa metálica em zinco como revestimento exterior. O betão armado, no fundo não tem influência nos resultados, visto ser utilizado em todas as coberturas.

#### 6.4.3. CATEGORIA DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.11, é possível verificar os valores associados a categoria ODP para a quantidade de material, expresso em Kg/m<sup>2</sup>, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

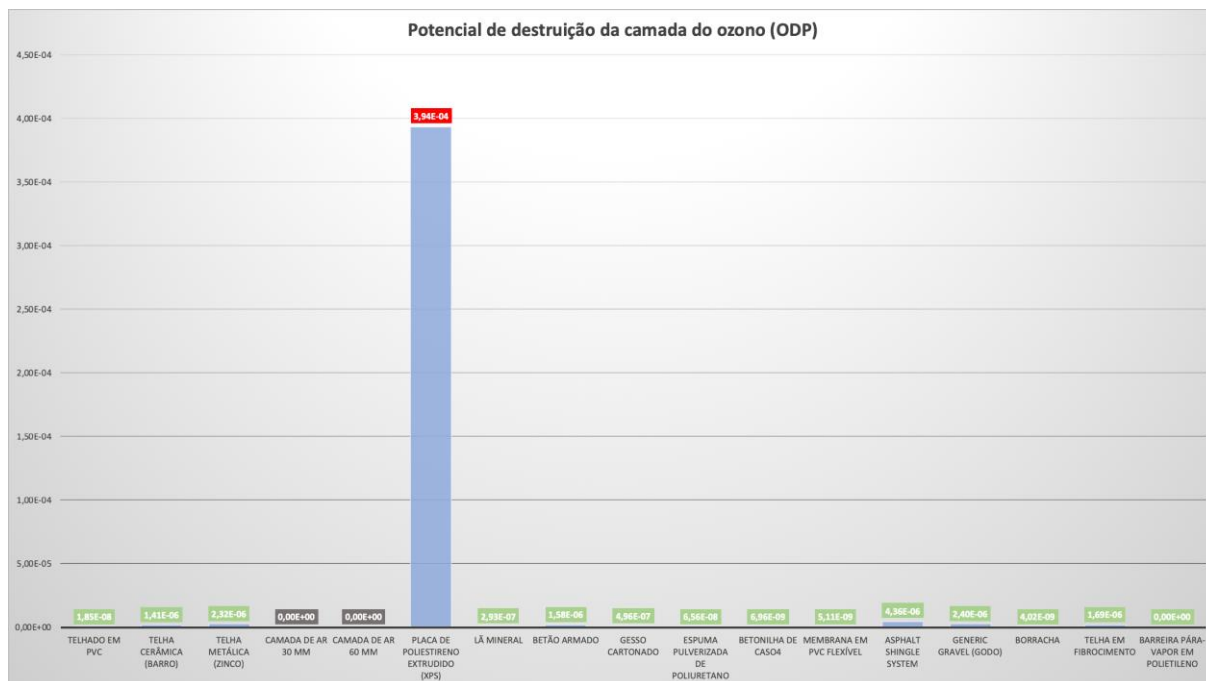


Fig. 6.11 - Categoria contribuição para a destruição da camada do ozono (ODP), para Kg/m<sup>2</sup> de material

A observação da Fig. 6.11 mostra que a placa de poliestireno extrudido (XPS) é o material que se destaca largamente face aos restantes materiais, sendo o que apresenta o valor mais elevado para este indicador, e assim, é o material que menos se adequa para utilização, no que a esta categoria diz respeito.

Os restantes materiais, apesar de apresentarem diferenças entre eles, estas são mínimas, pelo que se considera que todos apresentam um bom comportamento para este indicador, e, dessa forma, estão assinalados com a cor verde.

Analisado o desempenho das coberturas para o GWP, verifica-se que todas as que contém na sua constituição a placa de poliestireno extrudido (XPS), são aquelas que apresentam valores bastante mais elevados, face às restantes. Assim, conclui-se que este material tem um comportamento péssimo para este indicador.

#### 6.4.4. CATEGORIA ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.12, é possível verificar os valores associados a categoria AP para a quantidade de material, expresso em Kg/m<sup>2</sup>, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

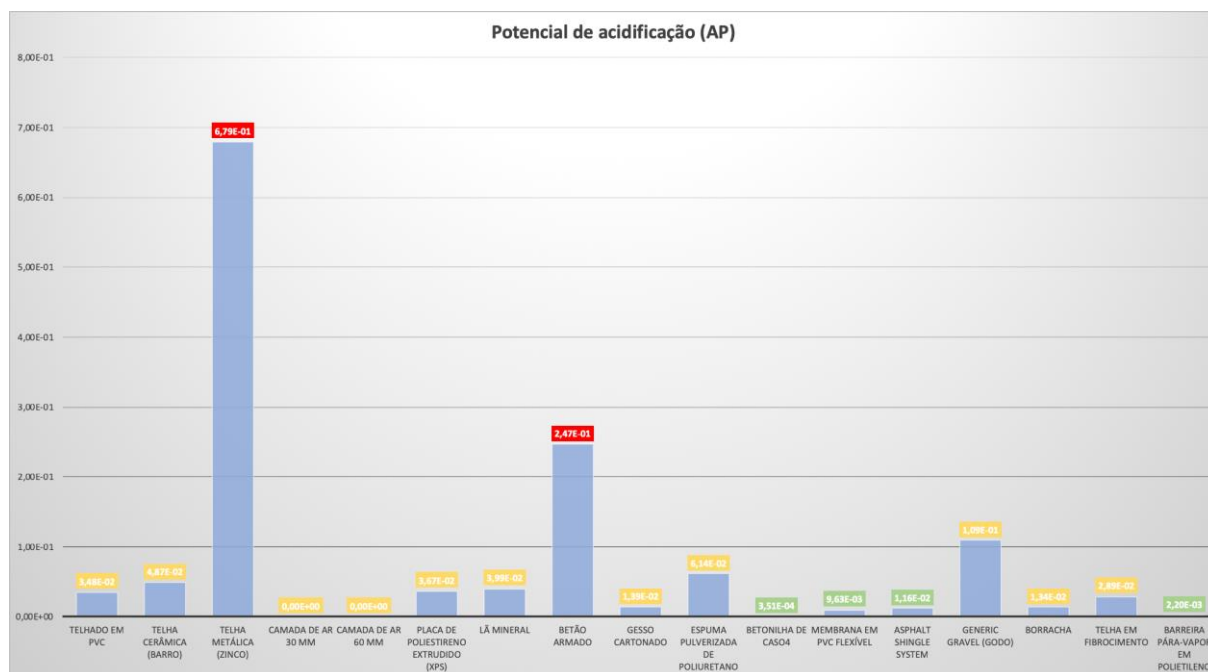


Fig. 6.12 - Categoria contribuição para a acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP), para Kg/m<sup>2</sup> de material

Neste caso, a Fig. 6.12 mostra que os materiais com valores mais baixos são a betonilha de CaSO<sub>4</sub>, a membrana em PVC flexível e a membrana asfáltica “Ashphalt Shingle System”, a barreira pára-vapor em polietileno, sendo por isso os materiais que melhor se adequam para esta categoria. Por outro lado, quer o betão armado quer a telha metálica voltam a ser aqueles em que os valores são mais elevados, resultando, assim, em matérias piores para a categoria em questão.

Por haver uma enorme discrepância nestes materiais com valores mais elevados, para a categoria AP as coberturas com piores resultados são as que contém a telha metálica em zinco, nomeadamente as soluções construtivas 5 e 6, para coberturas inclinadas.

#### 6.4.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.13, é possível verificar os valores associados a categoria POCP para a quantidade de material, expresso em Kg/m<sup>2</sup>, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

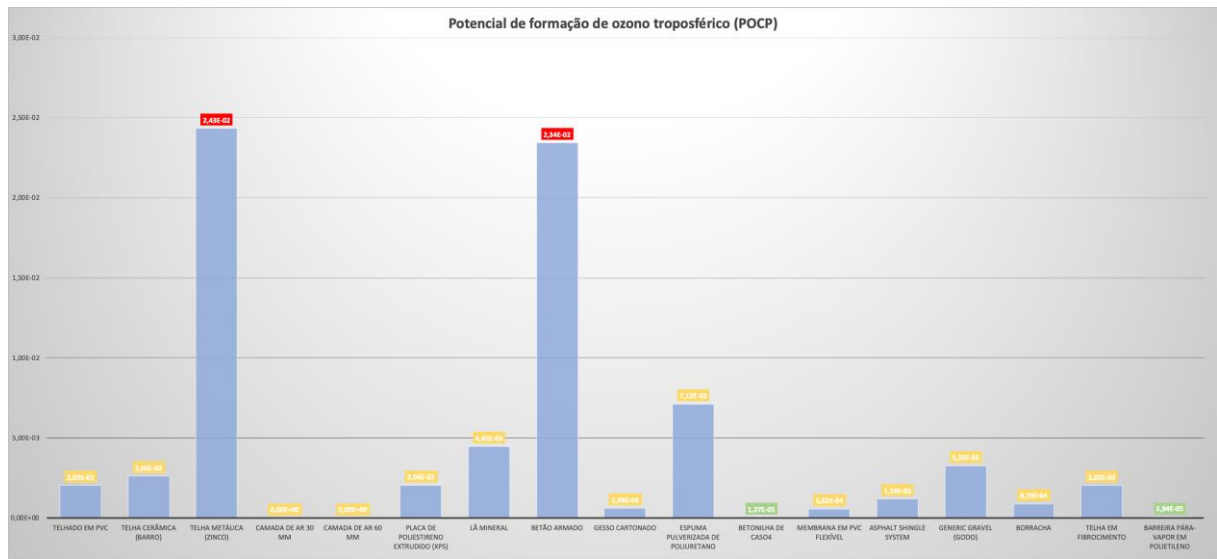


Fig. 6.13 - Categoria contribuição para a formação de ozono troposférico (POCP), para Kg/m² de material

A Fig. 6.13 mostra que os materiais com pior comportamento neste indicador são, novamente, a telha metálica em zinco e o betão armado. Os materiais betonilha de  $\text{CaSO}_4$  e a barreira pára-vapor em polietileno, são os materiais com menor valor associado a esta categoria, e, assim, os materiais mais adequados.

A Fig. 6.5 é sintomática destes resultados, visto que a cobertura inclinada 5 e cobertura inclinada 6, que contém a telha metálica em zinco como revestimento exterior, são aquelas que apresentam os valores mais elevados associados ao indicador POCP.

#### 6.4.6. CATEGORIA POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO (EP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.14, é possível verificar os valores associados a categoria EP, para a quantidade de material, expresso em Kg/m², utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

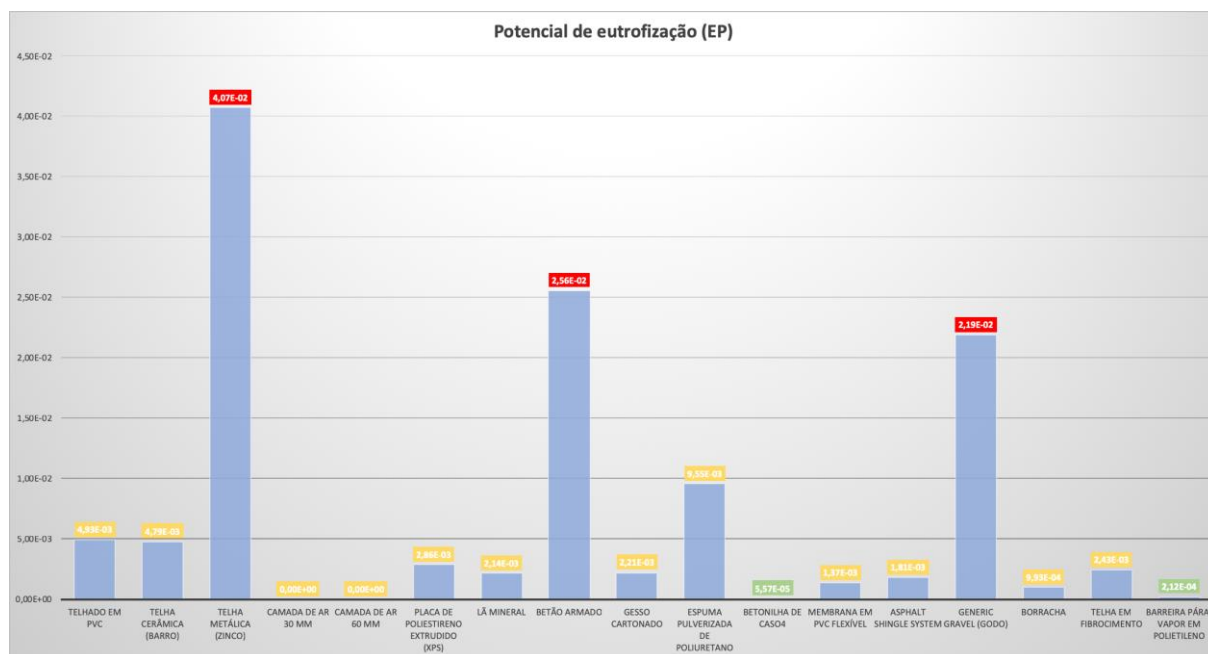


Fig. 6.14 - Categoria contribuição para a eutrofização (EP), para Kg/m2 de material

A análise a figura anterior, mostra que os materiais *generic gravel* (Godo), betão armado e telha metálica em zinco (ordenados respetivamente por ordem crescente). são aqueles onde os valores associados a esta categoria são mais elevados, tornando-os como os materiais menos adequados. Em contrapartida, os materiais betonilha de CaSO4 e a barreira pára-vapor em polietileno, são aqueles que apresentam os menores valores, e, desta forma, são os melhores materiais no que respeita ao potencial de eutrofização (EP).

#### 6.4.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.15, é possível verificar os valores associados a categoria ENR, para a quantidade de material, expresso em Kg/m2, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.



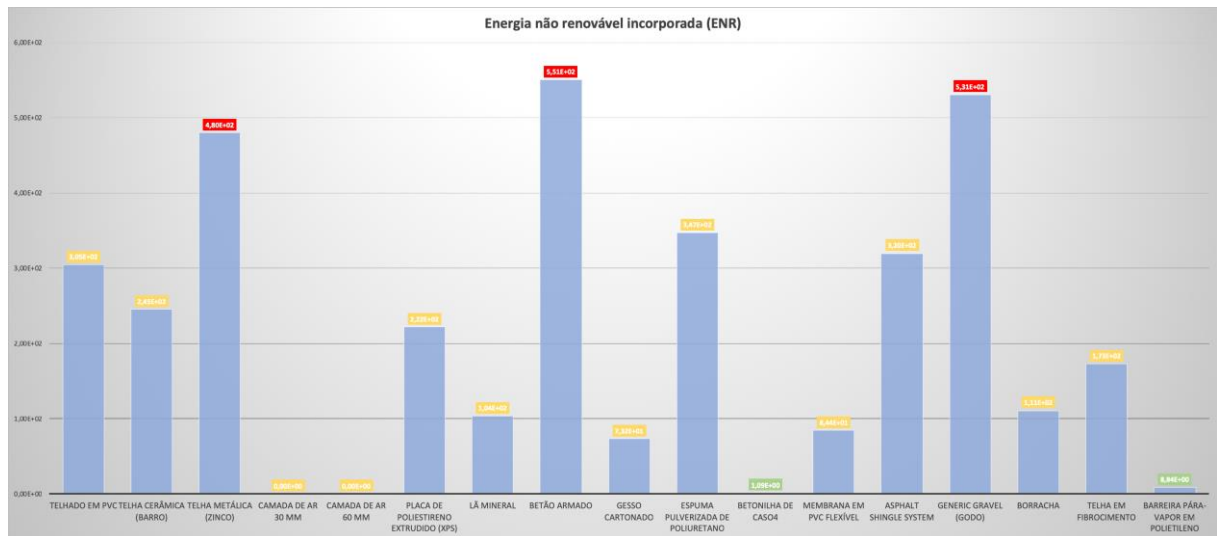


Fig. 6.15 - Categoria energia não renovável incorporada (ENR), para Kg/m2 de material

A análise a figura anterior, mostra que os materiais generic gravel (Godo), betão armado e telha metálica em zinco, são aqueles onde os valores associados a esta categoria são mais elevados, tornando-os como os materiais menos adequados. Em contrapartida, os materiais betonilha de CaSO4 e a barreira pára-vapor, são, novamente, aqueles que apresentam os menores valores, e, desta forma, são os melhores materiais no que respeita ao potencial de eutrofização (ENR).

#### 6.4.8. CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Na Fig. 6.16, é possível verificar os valores associados a categoria ENR, para a quantidade de material, expresso em Kg/m2, utilizado nas dez soluções construtivas de coberturas neste trabalho.

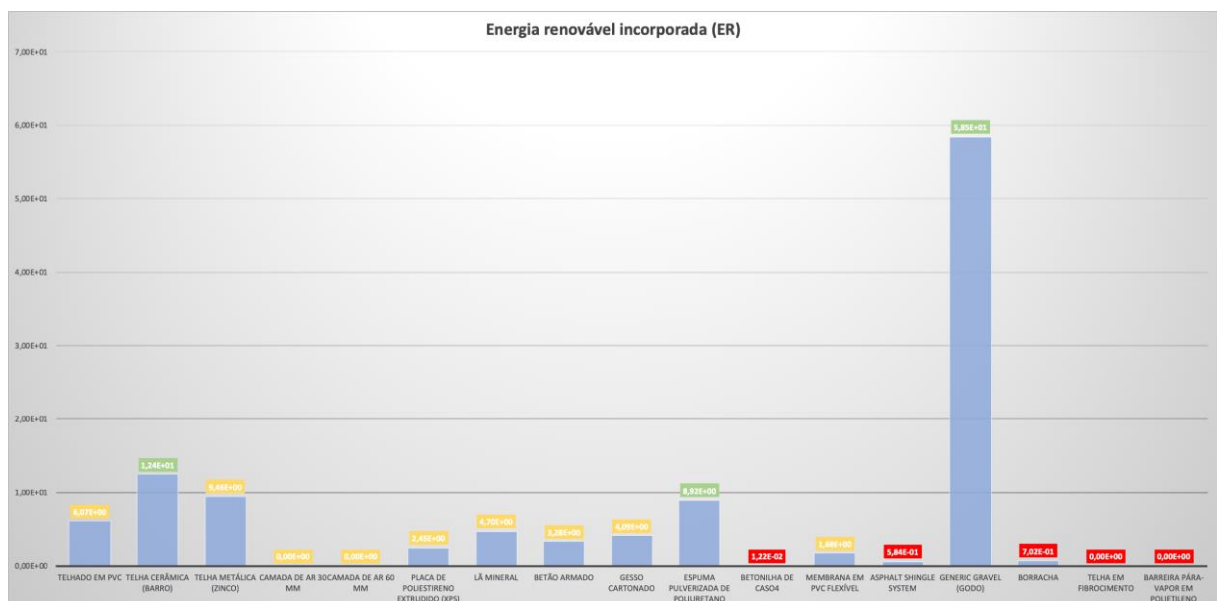


Fig. 6.16 - Categoria energia renovável incorporada (ER), para Kg/m2 de material

Os valores para este indicador são tanto melhores quanto forem estes valores. Assim, verifica-se que o material genérico grão (Godo), telha cerâmica em barro e a telha metálica em zinco apresentam os valores mais elevados, tornando-se, assim, nos materiais mais adequados no que respeita a este indicador. No entanto, os materiais, telha de fibrocimento, tela asfáltica e betoneira de  $\text{CaCO}_3$ , barreira para-vapor em polietileno e a borracha, são aqueles com valores inferiores, e deste modo, os materiais menos adequados para utilização.

Assim se explica que as coberturas planas 1 e 2 que utilizam o grão como revestimento exterior apresentem o maior valor associado a esta categoria, em total oposição às coberturas inclinadas 2, 3 e a cobertura plana 3 que utilizam a telha de fibrocimento e a tela asfáltica, na sua constituição, respetivamente.

## **6.5.INTERPRETAÇÃO DO CICLO DE VIDA, IACV, PARA 1 KG DE MATERIAL UTILIZADO**

### **6.5.1.CATEGORIA DIMINUIÇÃO DAS RESERVAS DOS RECURSOS ABIÓTICOS (ADP) EMPREGUE A 1 KG DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO**

Nas figuras seguintes, é possível observar os resultados da análise do impacto da produção de 1 Kg de cada material, para cada um dos oito indicadores, utilizados neste trabalho.

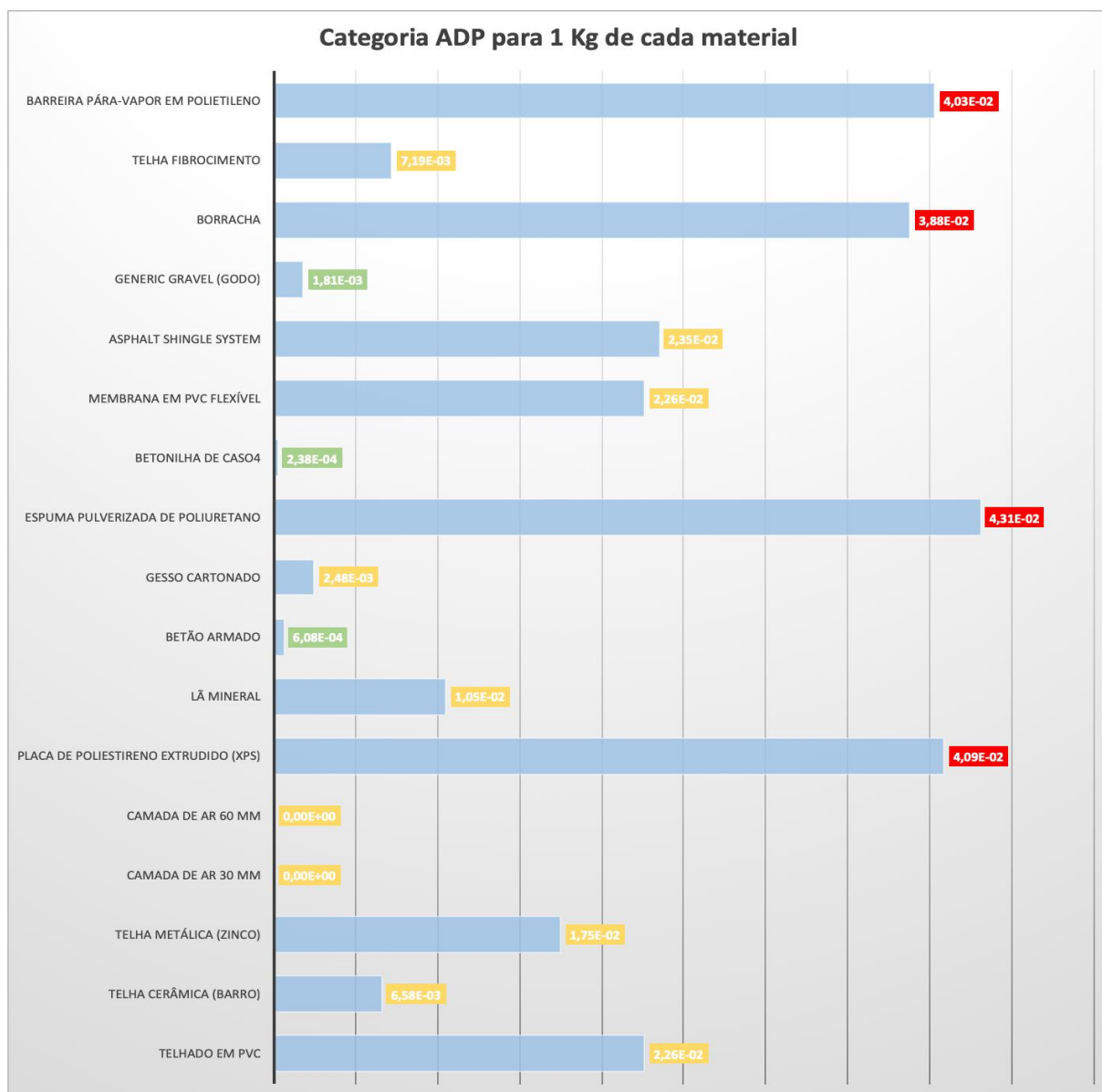


Fig. 6.17 - Categoria diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP), para 1 Kg de material

## 6.5.2.CATEGORIA CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL (GWP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO



Fig. 6.18 - Categoria aquecimento global (GWP), para 1 Kg de material

## 6.5.3.CATEGORIA DESTRUIÇÃO DA CAMADA DO OZONO (ODP), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

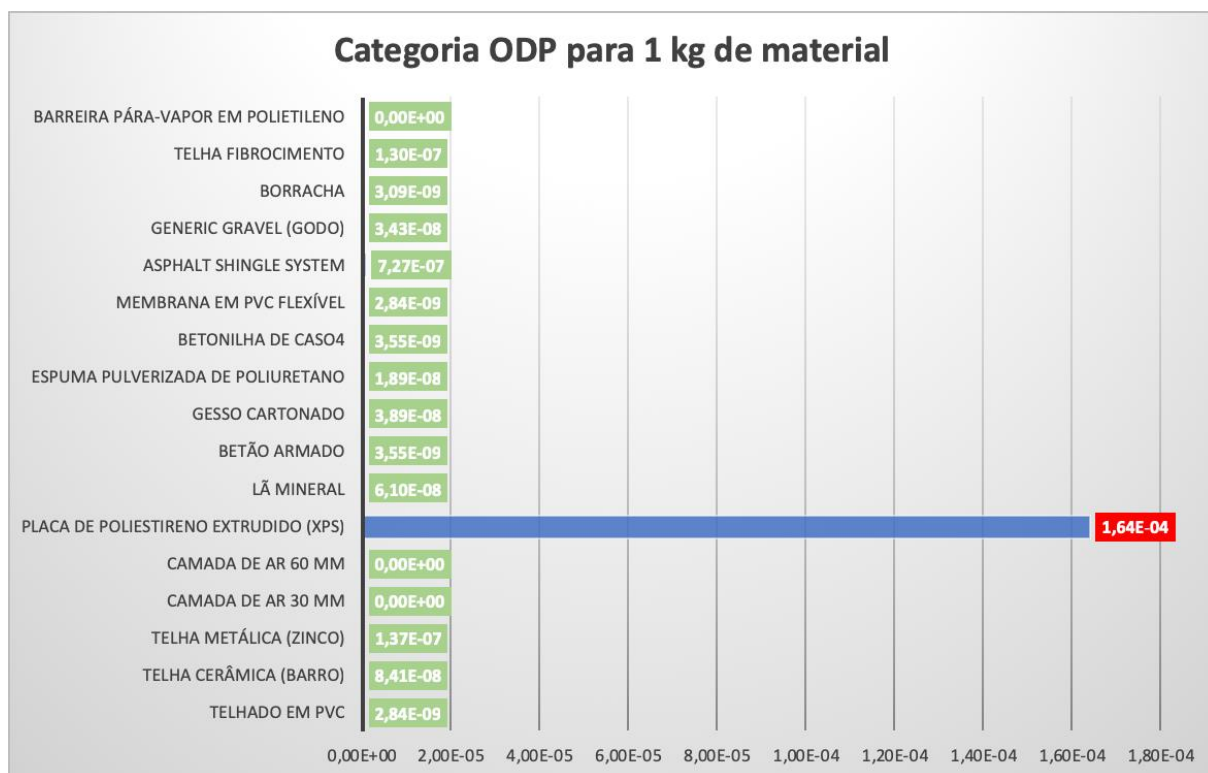


Fig. 6.19 - Categoria destruição da camada do ozono (ODP), para 1Kg de material

#### 6.5.4. CATEGORIA ACIDIFICAÇÃO DO SOLO E DOS RECURSOS HÍDRICOS (AP), EMPREGUE OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

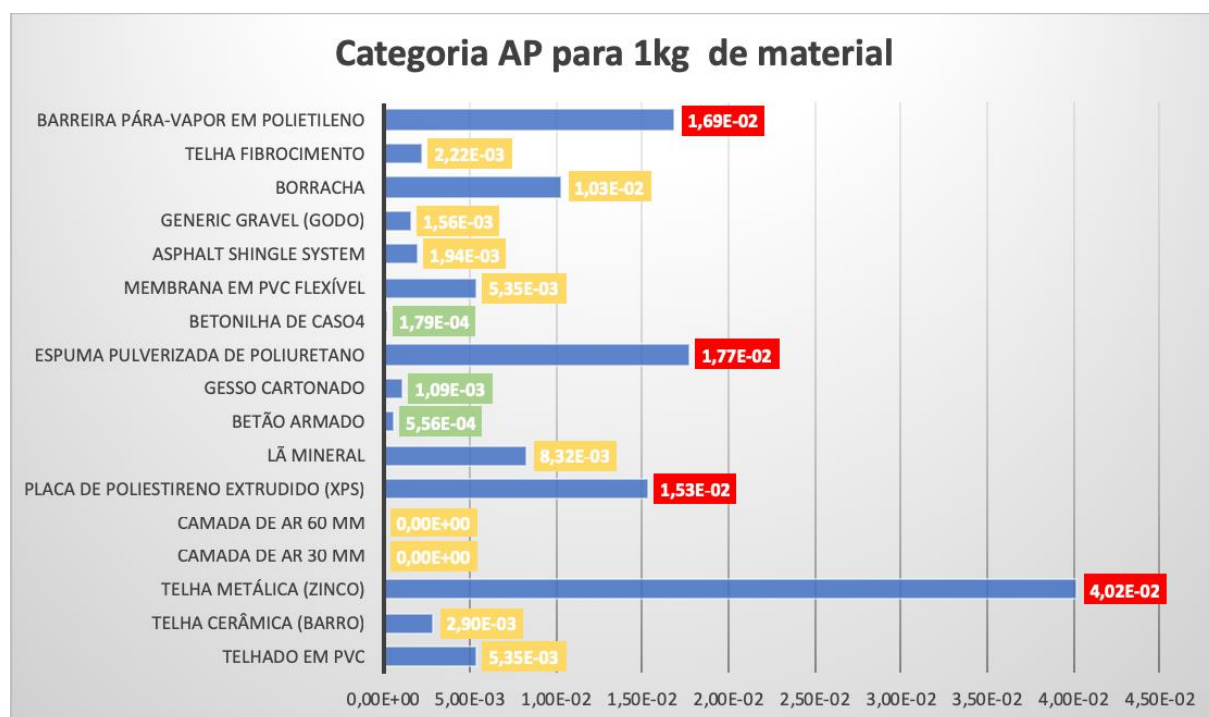


Fig. 6.20 - Categoria acidificação do solo e dos recursos hídricos (AP), para 1Kg de material

### 6.5.5. CATEGORIA FORMAÇÃO DE OZONO TROPOSFÉRICO (POCP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

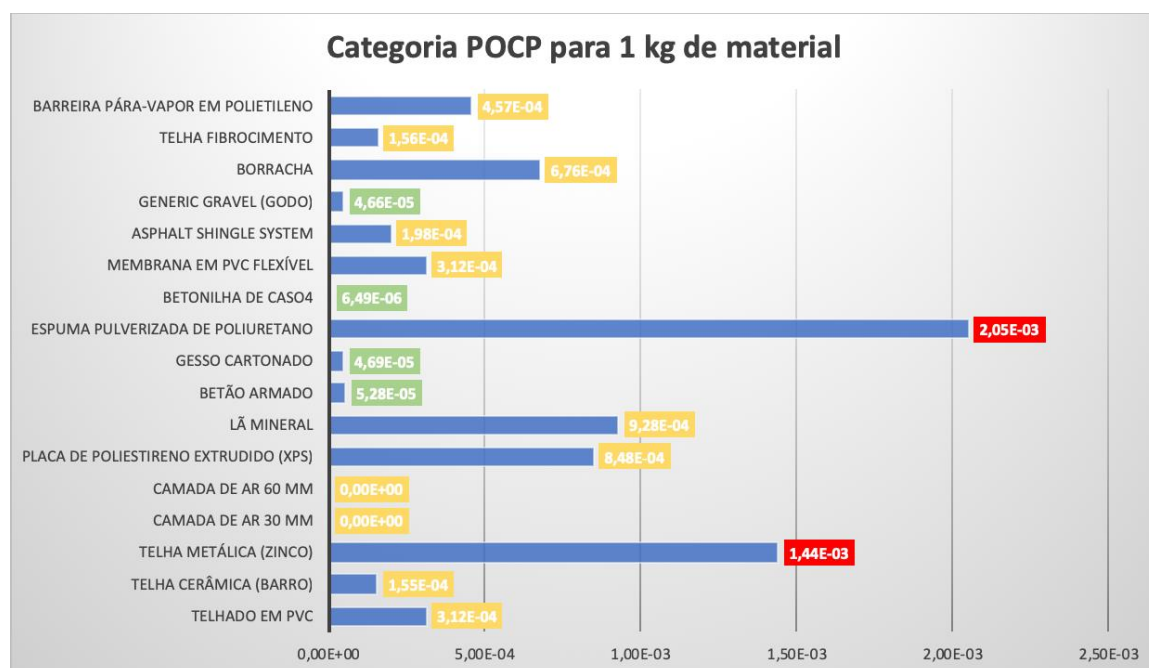


Fig. 6.21 - Categoria formação de ozono troposférico (POCP), para 1Kg de material

### 6.5.6. CATEGORIA POTENCIAL DE EUTROFIZAÇÃO (EP) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

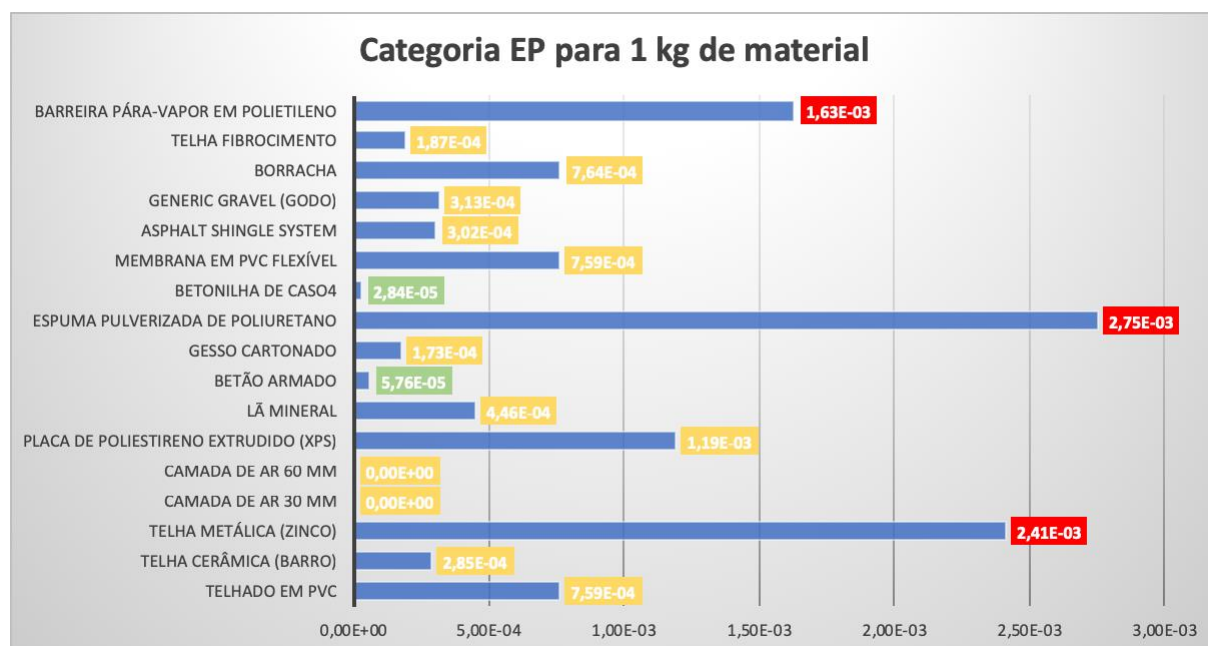


Fig. 6.22 - Categoria potencial de eutrofização (EP), para 1Kg de material

### 6.5.7. CATEGORIA ENERGIA NÃO RENOVÁVEL INCORPORADA (ENR) EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

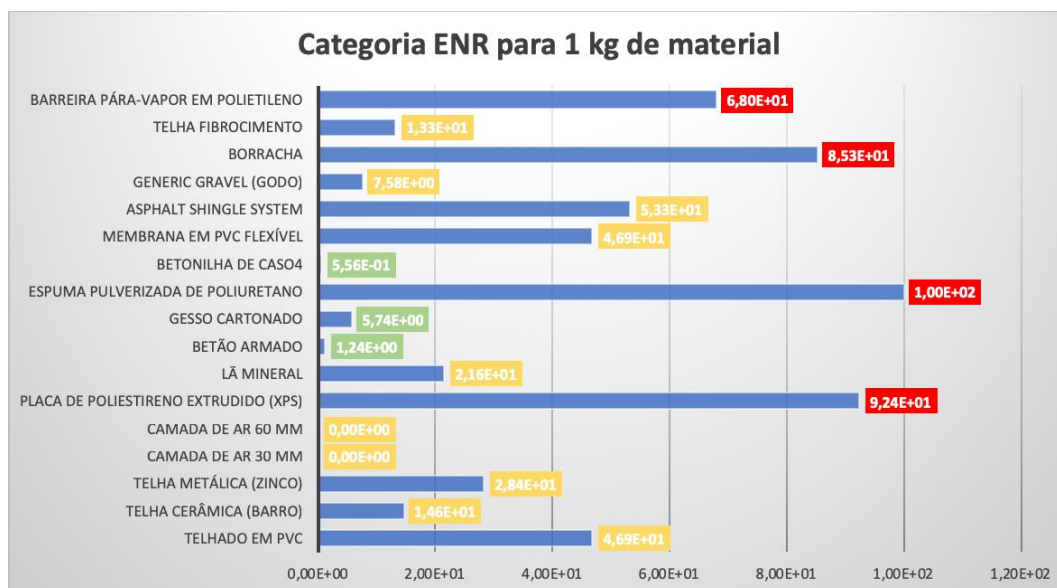


Fig. 6.23 - Categoria energia não renovável incorporada (ENR), para 1Kg de material

### 6.5.8. CATEGORIA ENERGIA RENOVÁVEL INCORPORADA (ER), EMPREGUE AOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

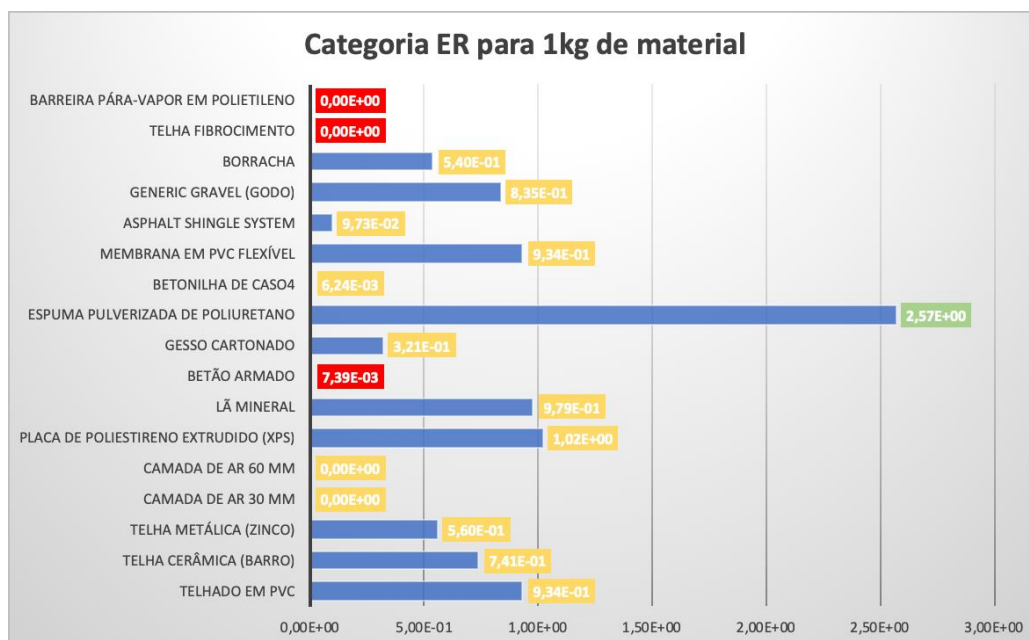


Fig. 6.24 - Categoria energia renovável incorporada (ER), para 1Kg de material



## **6.6. CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO**

Como podemos observar pelas figuras apresentadas anteriormente, relativamente aos valores dos impactes associados à produção de 1 Kg de cada material, verificamos que os valores são substancialmente diferentes, comparando com os valores dos impactes associados à utilização de cada material nas coberturas analisadas (Kg/m<sup>2</sup>).

Conclui-se, assim, que não é prudente comparar materiais aplicados numa cobertura, onde as suas quantidades utilizadas são completamente diferentes. Esta comparação apenas fornece uma referência, sobre os impactes ambientais da quantidade necessária dos materiais constituintes de uma cobertura. Assim, caso se pretenda, eventualmente, substituir algum material devido à sua fraca adequabilidade ambiental, deve-se:

1. Analisar os impactes ambientais no fabrico de 1 Kg do novo material, e comparar com o antigo.
2. Depois, deve-se saber qual a quantidade necessária do novo material para que desempenhe corretamente as suas funções na cobertura, e de seguida, efetuar o estudo ACV para esta nova quantidade.
3. De seguida, deve-se analisar os resultados obtidos, com os resultados do material a substituir.
4. Se estas duas análises forem positivas para o material novo, isto é, se se chegar à conclusão que a produção de 1Kg de novo material e a produção da quantidade necessária do novo material para se colocar na cobertura, tem menores impactes ambientais, então deve-se optar pela substituição dos mesmos.

# 7

## CONCLUSÃO

### 7.1. CONCLUSÕES GERAIS

Uma exploração inapropriada de recursos naturais e a, resultante produção de emissões atmosféricas e resíduos têm um elevado impacto no agravamento das alterações climáticas no nosso planeta. Nos dias que correm, não se pode falar do setor da construção civil sem abordar o tema sustentabilidade, visto este setor ser dos mais prejudiciais para o meio ambiente. A ideia defendida pelo desenvolvimento sustentável, gira em torno da premissa que os ecossistemas estão na base das sociedades que geram economia.

Os problemas de humidades em edifícios, constituem graves problemas quer para a preservação quer para a segurança do mesmo. Para além disso, esta patologia representa um sério risco para a saúde daqueles que o utilizam. Desta forma, é necessário dimensionar e construir coberturas capazes de mitigar estes problemas, dado que a cobertura é o primeiro elemento de um edifício em contacto com o ambiente exterior, e, por isso, é a primeira “barreira” contra a água e a humidade.

A escolha dos materiais adequados é fundamental, para garantir que uma cobertura desempenha a sua função corretamente, no entanto é imprescindível a avaliação dos seus impactes ambientais. Para a preservação do planeta Terra é essencial que se utilizem materiais ecológicos, dentro do possível, mas que garantam uma boa prestação da cobertura. Assim, com a aplicação do método da ACV, consegue-se avaliar mais facilmente, quais os materiais com mais e menos impacto ambiental, para depois, ser feita uma escolha para utilização em obra. Com esta metodologia, é possível, também, a avaliação de coberturas, como um todo, e escolher aquela que garanta um bom desempenho quer construtivo, quer ambiental.

Nesta dissertação foi feita uma análise dos impactes ambientais para as coberturas completas, para a quantidade de material utilizado em cada cobertura, e para o fabrico de 1Kg de material. Verificou-se que a análise pode não ser totalmente clara, pois quando se avalia a quantidade de material utilizado numa cobertura, os resultados podem ser “alterados” devido a diferença de massa de cada material. Torna-se assim importante, realizar a avaliação utilizando a mesma quantidade de todos os materiais. Desta forma, é possível fazer uma comparação entre impactes de materiais bem mais precisa.

Os resultados desta avaliação mostram que a placa de poliestireno extrudido (XPS) e a barreira pára-vapor e polietileno são os materiais mais prejudiciais, quando se faz a análise para a mesma quantidade de todos os materiais. Já o betão surge como o material que causa menos impacto.

No entanto, quando se efetua a análise para a quantidade de material usada em cada cobertura, o betão surge, na grande maioria das vezes, como aquele que evidencia mais impactes, no entanto, como foi dito anteriormente, deve-se ao facto de ser utilizado uma grande quantidade de betão em cada cobertura.

Em termos de coberturas, as que obtiveram melhores resultados na ACV foram a cobertura inclinada 3 e 4, já as coberturas inclinadas 5 e 6, foram as que apresentaram resultados piores.

No que concerne ao comportamento em relação à humidade, todas as coberturas planas, e a cobertura inclinada 3 foram as que mostraram resultados bastante satisfatórios nas simulações efetuadas no WUFI.

## **7.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

A sustentabilidade revela-se cada vez mais um tema fulcral em toda a indústria, principalmente na construção civil.

As coberturas são um elemento importantíssimo de um edifício, e, desta forma, será interessante a pesquisa de novos materiais, mais ecológicos, onde para além da aplicação da ACV fosse, também efetuada uma avaliação dos custos do ciclo de vida (CCV).

Seria pertinente, também, o estudo sobre coberturas verdes, e as melhorias que estas poderiam causar, em termos de qualidade de vida, ao serem utilizadas numa grande cidade europeia.



## BIBLIOGRAFIA

- 16 tipos de telhas mais comuns e suas características (FOTOS) - Tua Casa, 6 Feb. 2018. [Consult. 16 dez. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.tuacasa.com.br/tipos-de-telhas/>>.
- A. Pinho; J. AGUIAR; J. V. PAIVA - Guia Técnico de Reabilitação Habitacional
- ANA NOVAIS - Avaliação do ciclo de vida de soluções de reabilitação. Caso de estudo. 2017) 122.
- Aula-Desempenho termico paredes e coberturas.pdf - [s.d.]).
- Avaliação do ciclo de vida\_R\_Mateus\_Luís\_Bragança0002.pdf - [s.d.]).
- Barreira de vapor para o telhado (48 fotos): qual a necessidade de isolamento térmico e impermeabilização de um telhado inclinado e plano - [Em linha] [Consult. 16 dez. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://pt.decorexpro.com/paroizolyaciya/dlya-kryshi/>>.
- BATISTA, Fábio Nestor Adão - O uso da cortiça na construção sustentável. [s.d.]) 76.
- CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES Avaliação do Risco - [s.d.]).
- CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES Avaliação do Risco - [s.d.]).
- COSTA, Beatriz Rego Moreira Da Silva Costa - ANÁLISE COMPARATIVA DE PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E HUMIDADE – WUFI E DELPHIN. 2019) 144.
- DE, Beatriz Rego Moreira Da Silva Costa - Análise Coparativa de Programas de simulação Numerica de Transferencia de calor e humidade - WUFI e Delphin. 2019) 144.
- FERNANDES - Métodos de Avaliação da Sustentabilidade das Construções. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto : Universidade do Porto, 2013
- FERREIRA DUARTE, OÃO PEDRO SEQUEIRA RODRIGUES - CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS INTERIORES - Avaliação do Risco. 2010).
- GOUVEIA, Sandra Soraia Silva - ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE COBERTURAS. 2015) 231.
- HINTON, Leanne; NICHOLS, Johanna; OHALA, John J. - Sound symbolism. [S.l.] : Cambridge University Press, 2006. ISBN 0-521-02677-6.
- Impermeabilizantes para telhados: entenda as diferenças - Geocontract - [Em linha] [Consult. 16 dez. 2019]. Disponível em WWW:<URL:<https://geocontract.com.br/Post/10/impermeabilizantes-para-telhados-entenda-as-diferencas>>.
- INE - O Parque Habitacional e a sua Reabilitação Análise e Evolução 2001-2011
- J. G. LOPES - Revestimentos de Impermeabilização de Coberturas em Terraço. Lisboa : Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994
- LNEC\_ITE\_50.pdf - [s.d.]).

- MASCARENHAS, Jorge - Sistemas de Construção IV. [S.l.] : Lisboa: Livros Horizonte, 2003
- MASCARENHAS, Jorge - Sistemas de Construção IV- Coberturas Planas, Juntas; Materiais básicos (2a parte): Materiais Ferrosos e Alumínio
- MATEUS, R. - Avaliação da sustentabilidade na construção: propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis. [S.l.] : Universidade do Minho, 2009
- MATIAS - Avaliação do Desempenho Térmico de Proteções Refletantes Aplicadas em Coberturas Inclinadas
- MORISHITA, Arq Claudia *et al.* - Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v.4). [s.d.]) 13.
- MORISHITA, Arq Claudia *et al.* - Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v.4). [s.d.]) 13.
- NOVAIS, Ana Sofia - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO. CASO DE ESTUDO. 2017) 122.
- O que é o WUFI®? | WUFI (en) - , [s.d.]. [Consult. 7 jan. 2020]. Disponível em WWW:<URL:<https://wufi.de/en/software/what-is-wufi/>>.
- PINHEIRO, M. D. - Ambiente e Construção Sustentável. 2006).
- Planas. Coberturas. Portugal - [Em linha] [Consult. 16 dez. 2019]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Coberturas/Planas.html](http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Coberturas/Planas.html)>.
- Preço em Portugal de m<sup>2</sup> de Cobertura plana não acessível, ventilada, auto-protegida. Impermeabilização com lâminas asfálticas. Gerador de preços para construção civil. CYPE Ingenieros, S.A. - [Em linha] [Consult. 17 dez. 2019]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Coberturas/Planas/Nao\\_acessiveis\\_ventiladas/QAE010\\_Cobertura\\_plana\\_nao\\_acessivel\\_\\_vent.html](http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Coberturas/Planas/Nao_acessiveis_ventiladas/QAE010_Cobertura_plana_nao_acessivel__vent.html)>.
- S. JALALI; F. P. TORGAL - A Sustentabilidade dos Materiais de Construção. 2010).
- SILVA, Sandra Monteiro - Avaliação do Impacto Energético e Económico de Diferentes Soluções Construtivas. 2003) 18.
- Tiago Romão - Evolução do Sector da Construção em Portugal. Lisboa : Instituto Superior técnico de Lisboa, 2015